

Trabajo Fin de Grado

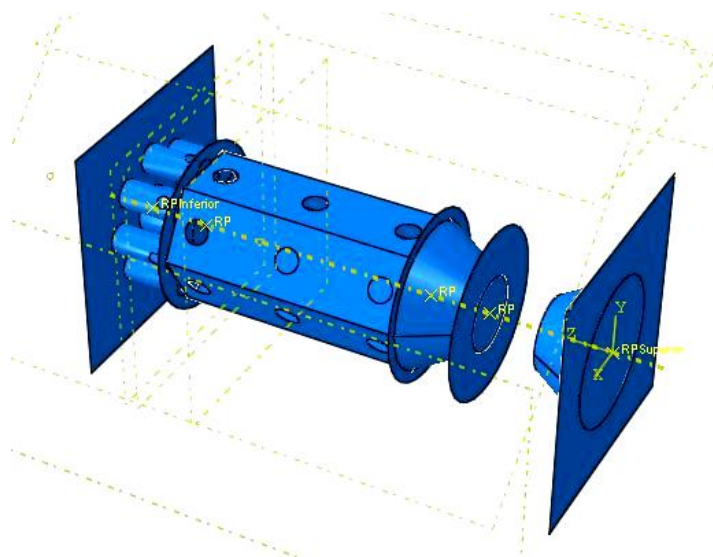
Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño y optimización de un dispositivo de frenado para vías terminales

Autor: Carlos Portillo Rubio

Tutor: Ramón Eulalio Zaera Polo

Septiembre de 2016



Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras



Índice

Agradecimientos.....	4
1. Introducción	6
1.1. Motivación	6
1.2. Objetivos	8
1.3. Definición y restricciones del problema	9
2. Antecedentes.....	12
2.1. Sistemas de Seguridad activos y pasivos	12
2.2. Sistemas de seguridad en las vías ferroviarias: Toperas ferroviarias	12
2.2.1. Historia de los sistemas de frenado en vías terminales	13
2.2.2. Tipos de toperas ferroviarias	16
2.3. Elección del material de absorción de energía	24
Introducción al aluminio.....	25
3. Metodología	28
3.1. Propiedades del Aluminio 1100-H12 y Modelo de endurecimiento	28
3.2. Variables de interés y caracterización del Impacto	31
3.3. Modelado del problema de impacto	33
3.3.1. Introducción al Método de Elementos Finitos	34
3.3.2. Abaqus y Módulos utilizados	37
4. Resultados y análisis	48
4.1. Introducción.....	48
4.2. Tamaño de los elementos finitos. Sensibilidad de la malla	50
4.3. Fase 1. Modelos de sección básica.	53
4.3.1. Tubo con sección cuadrada	54
4.3.2. Tubo con sección hexagonal.....	57
4.3.3. Tubo con sección circular	59
4.3.4. Tubo con sección octogonal	60
4.3.5. Variables de interés. Fase 1.....	62
4.3.6. Conclusiones. Fase1.....	66
4.4. Fase 2. Optimización de los modelos de secciones básicas.	66
4.4.1. Tubos con aceleradores.....	67
4.4.2. Tubos con elementos contra el impacto	69

4.4.3.	Modelos con sección hexagonal y cuadrada.....	72
4.4.4.	Conclusiones. Fase 2.....	75
4.5.	Fase 3. Modelos multitubulares.	75
4.5.1.	Multitubo de sección cuadrada.....	76
4.5.2.	Multitubo de sección circular.....	78
4.5.3.	Multitubo de sección hexagonal. Estructura con forma de panal.	80
4.5.4.	Variables de interés. Fase 3.....	82
4.5.5.	Conclusiones. Fase 3.....	85
4.6.	Fase Final. Modelos de doble estructura.....	86
4.6.1.	Modelo 1.....	86
4.6.2.	Modelo 2.....	91
4.6.3.	Modelo 3.....	96
4.6.4.	Modelo 4.....	100
4.6.5.	Modelo Final.....	105
5.	Conclusiones y trabajos futuros	111
6.	Desarrollo del proyecto y presupuesto	115
6.1.	Diagrama Gantt del proyecto	115
6.2.	Presupuesto	116
6.2.1.	Costes laborales.....	116
6.2.2.	Costes materiales	116
6.2.3.	Coste Total del proyecto.....	117
	Bibliografía.....	119
	Índice de Ilustraciones.....	121
	Índice de tablas.....	124

Agradecimientos

A lo largo de esta etapa en la Universidad que está a punto de finalizar me llena de satisfacción y felicidad todo el apoyo recibido, en especial el de mis padres, de toda mi familia y de mis amigos de siempre, por confiar en mí y ayudarme, tanto en los momentos buenos como en los malos de estos últimos cuatro años.

Agradecer a mis compañeros y amigos que he conocido en esta etapa, concretamente a Jorge, David y Cristina, que sin ellos quizás no hubiera llegado a donde estoy ahora.

Por último, gracias a la Universidad y a todos sus trabajadores. Muchas gracias a mi tutor, el profesor Ramón Zaera Polo, por todo su apoyo y dedicación en mi proyecto y mi formación.

Capítulo I. Motivación y Objetivos

1. Introducción

1.1. Motivación

La sociedad está en continuo crecimiento. El aumento de población y la necesidad de comunicarse e intercambiar conocimientos o simplemente viajar está cada vez más presente en el mundo. Por ello[^], las industrias dedicadas al transporte necesitan fabricar aún más vehículos y que estos recorran la mayor distancia posible en el menor de los tiempos, Ilustración 1. Esto da lugar a un aumento del riesgo a colisiones y una mayor gravedad en las lesiones de los ocupantes si estas sucediesen (1). La protección de las personas ante accidentes es muy relevante y se necesitan continuas mejoras en los vehículos para que sean más seguros. Se debe conocer entonces, el número de accidentes y vidas que estos se cobran, Tablas 1 y 2. Se puede comprobar que aunque el número de accidentes ha disminuido en la última década, el número de víctimas lo ha hecho también y en mayor medida, esto es debido a que se dedican muchos medios a la investigación y al desarrollo de nuevos sistemas de seguridad con el objetivo de proteger a los conductores y ocupantes de los vehículos (2).

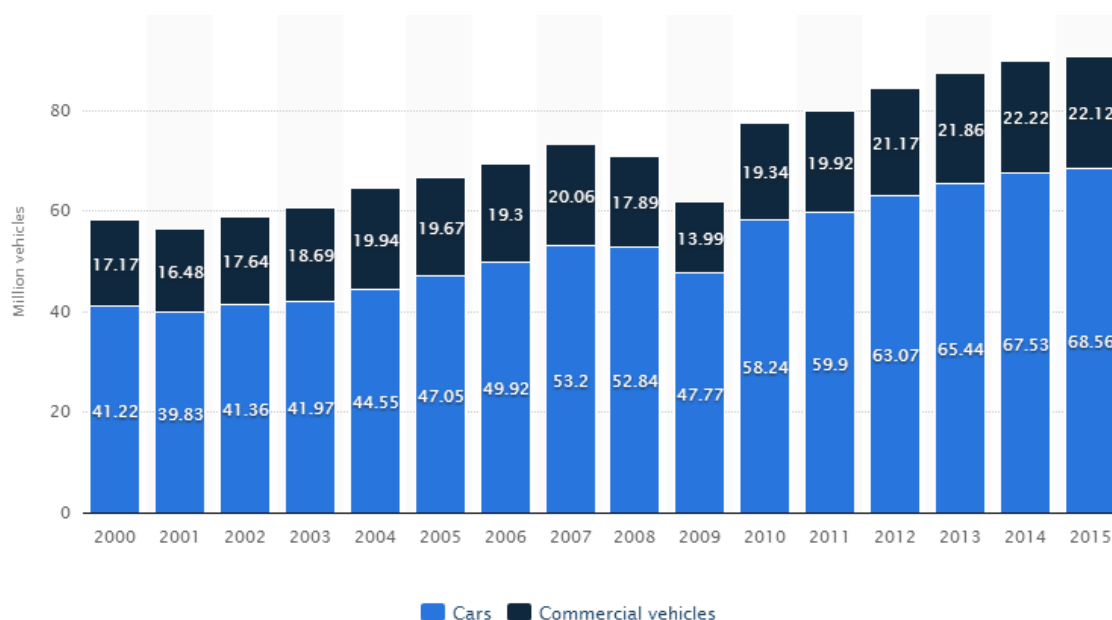


Ilustración 1. Crecimiento del uso de vehículos en el siglo XXI. Cortesía de Statista

Tabla 1. Accidentes y víctimas, año 2002 (2)

Accidentes y víctimas por meses. Año 2002. ESPAÑA					
TOTAL GENERAL					
MES	Accidentes con víctimas		Víctimas		
	Total	Fallecidos	Total	Fallecidos	Heridos graves
Enero	7.390	356	11.117	472	1.878
Febrero	7.128	292	10.700	377	1.763
Marzo	8.235	320	12.772	429	2.277
Abril	7.895	274	11.653	360	2.016
Mayo	8.426	301	12.740	406	2.212
Junio	8.923	356	13.796	471	2.402
Julio	9.243	362	14.658	505	2.470
Agosto	8.292	428	13.944	558	2.599
Septiembre	8.294	345	12.793	437	2.253
Octubre	8.574	327	13.165	448	2.136
Noviembre	8.122	331	12.618	435	2.115
Diciembre	7.911	339	12.308	449	2.035
TOTAL	98.433	4.031	152.264	5.347	26.156

Tabla 2. Accidentes y víctimas, año 2014 (2)

Accidentes y víctimas por meses. Año 2014. ESPAÑA					
TOTAL GENERAL					
MES	Accidentes con víctimas		Víctimas		
	Total	Fallecidos	Total	Fallecidos	Heridos graves
Enero	7.370	93	10.159	113	617
Febrero	7.069	84	9.906	99	661
Marzo	7.836	100	10.847	132	819
Abril	7.569	108	10.580	141	786
Mayo	7.797	103	10.812	123	873
Junio	7.905	121	11.052	153	927
Julio	8.023	122	11.413	153	886
Agosto	7.078	115	10.438	156	890
Septiembre	7.682	137	10.804	162	800
Octubre	8.138	112	11.165	143	836
Noviembre	7.698	107	10.737	158	791
Diciembre	7.405	127	10.407	155	688
TOTAL	91.570	1.329	128.320	1.688	9.574

Por estos motivos, el estudio, diseño, fabricación y optimización de nuevos elementos que proporcionen protección a los ocupantes de cualquier vehículo es de gran importancia. Las industrias del transporte invierten muchos recursos para conseguir que los vehículos sean más seguros.

Algunos de los sistemas de seguridad tienen como principal objetivo proteger a los usuarios del vehículo disipando la energía propia de una colisión, es el caso de las estructuras de absorción de energía. La energía cinética es absorbida y se transforma en energía de deformación de las estructuras de seguridad. La deformación controlada, manteniendo el espacio interior del vehículo intacto, y las bajas desaceleraciones que se producen gracias al uso de estos sistemas, permiten un menor índice de mortalidad. Las estructuras en un vehículo están compuestas de una parte deformable como son estas estructuras de seguridad para absorber cualquier impacto y otra parte más rígida que cierra el habitáculo de los ocupantes.

Estas estructuras no se usan únicamente en los medios de transporte sino que también son utilizadas en las barreras de seguridad de las carreteras, en la carcasa de los tanques de líquidos contaminantes o en los cascos de seguridad (3).

1.2. Objetivos

En el presente proyecto se completará el estudio de dos estructuras tubulares, una situada en el tren y otra en la topera, que colisionan entre ellas. El proyecto constará del diseño y optimización de las estructuras teniendo en cuenta unos parámetros de interés como las desaceleraciones, las deformaciones o la masa de los elementos. Es muy importante que la masa utilizada no comprometa la comodidad y la seguridad de los pasajeros que se encuentran dentro del vehículo; que la velocidad esté controlada con una desaceleración constante; que se produzca una disipación total de la energía siendo la velocidad final de la estructura igual a cero y, por último, que el espacio interior se mantenga constante. Para que estos parámetros se cumplan, se estudiarán diferentes modelos, sometidos a unas condiciones de contorno idénticas y se compararán entre sí hasta completar un diseño final apropiado y eficaz.

El proyecto pretende partir de un prototipo y recoger el proceso de mejora a partir del análisis de los resultados de las simulaciones, estudiando los motivos por los que se producen comportamientos no deseables.

1.3. Definición y restricciones del problema

El problema trata del uso de tubos de espesor fino para la absorción de la energía cinética de un vehículo ferroviario en movimiento. Estas estructuras se colocarán tanto en el final de la vía como en el propio tren. Es importante la definición de unas condiciones que limiten las soluciones a este problema. Las estructuras estarán empotradas a dos placas rígidas, una fija y otra móvil, que representan la pared en la que está colocada la topera y el propio tren.

Condiciones del tren:

- La masa del tren es de 1000 kg.
- La velocidad inicial es de 15 m/s.

Condiciones de la topera:

- La colocación de la placa que representa la topera es en el plano vertical.

Condiciones de las estructuras:

- Las dimensiones máximas de la estructura han de ser 2 m de alto y 2.5 m de ancho, la longitud no está limitada.
- La estructura tiene que estar empotrada únicamente en el plano vertical.
- La estructura debe detener completamente el vehículo ferroviario.

De estas condiciones cabe destacar que aunque la longitud no esté limitada, esta no debe ser muy grande ya que propiciaría un posible pandeo de la estructura y por lo tanto, una pérdida de la eficacia a la hora de frenar el tren. Otro dato de interés es cómo se detiene el vehículo. La estructura es el elemento que debe frenar el vehículo y por lo tanto, debe de ser capaz de hacerlo sin colapsar. El colapso se produce cuando la estructura es incapaz de absorber más energía, y es la placa fija la que la absorbe. Esto se traduce en una drástica disminución de las reacciones en esta placa, así como una disminución de aceleraciones en la placa móvil.



Es importante destacar que aunque se espera que ambas estructuras se deformen, la situada junto al vehículo debería ser más sencilla que la de la topera por si se tuviera que realizar cualquier tipo de mantenimiento en el tren.

Capítulo II. Antecedentes

2. Antecedentes

2.1. Sistemas de Seguridad activos y pasivos

Para la seguridad de los pasajeros en un medio de transporte se utilizan numerosos sistemas de seguridad que se encargan de proteger las vidas de los ocupantes. Para mantener estos sistemas optimizados, los fabricantes realizan numerosos estudios para disminuir el número de accidentes y los daños que puedan sufrir los pasajeros.

Estos sistemas se dividen en dos, los sistemas de seguridad activa y pasiva. Los primeros tienen como objetivo evitar que se produzca un accidente. Son los elementos que proporcionan al vehículo eficacia y estabilidad. Los sistemas de seguridad pasiva, por el contrario, contribuyen a la reducción de los daños que se producen cuando no se puede evitar el accidente. Dentro de los sistemas de seguridad activa podemos encontrar una gran cantidad de elementos como los sistemas de dirección y suspensión o más complejos, como el sistema antibloqueo de ruedas o el programa electrónico de estabilidad. Los sistemas pasivos, como ya se ha explicado, se basan en disminuir los daños de cualquier accidente, en este bloque encontramos los cinturones de seguridad, cascos, la carrocería, las barreras de seguridad, etc. (4)

2.2. Sistemas de seguridad en las vías ferroviarias: Toperas ferroviarias

En la industria ferroviaria, los sistemas de seguridad utilizados son parecidos a los usados en cualquier otro medio de transporte y tienen los mismos objetivos de protección. Los vehículos ferroviarios constan de muchos sistemas de seguridad pasiva entre los que se encuentran las toperas, unos dispositivos de frenado para vías terminales, fabricadas con hormigón o acero que transforman la energía cinética en deformación plástica. Estas toperas son rígidas y están ancladas en la vía. Con el mismo principio de absorción de energía en la colisión de un vehículo, se podrían fabricar toperas formadas por tubos que se deformen tras el choque. Además de en las toperas, en el mismo vehículo se podría instalar otra estructura, también deformable, que junto con la topera actuase como sistema de seguridad cuando la colisión sea inevitable.

2.2.1. Historia de los sistemas de frenado en vías terminales

Las toperas actuales no se parecen en absoluto a las primeras toperas fabricadas a principios del siglo XIX. Con la creación de las primeras vías para locomotoras, 1826, nacieron también los primeros sistemas para su frenado y amortiguamiento entre vagones. Al principio consistían simplemente en bloques de madera con una cabeza de metal, los llamados *dumb buffers* o “amortiguadores tontos”. Los *dumb buffers* no aportaban la seguridad necesaria y se siguieron fabricando hasta que en 1909 se declararon ilegales. Estos primeros sistemas también se introdujeron con cubiertas de piel para intentar reducir el efecto del impacto, como era de esperar no fueron exitosos debido al poco efecto amortiguador que aportaban.

A inicios del siglo XIX, se diseñaron los primeros amortiguadores por muelle para la línea entre Manchester y Liverpool. El ingeniero inglés Sir John Brown en 1831 inventó la primera estructura cónica con muelle para amortiguar la colisión entre los vagones de los vehículos ferroviarios. El modelo consistía en un muelle que se incorporaba al propio vagón sin tener que realizar taladros, ilustración 2. (5)

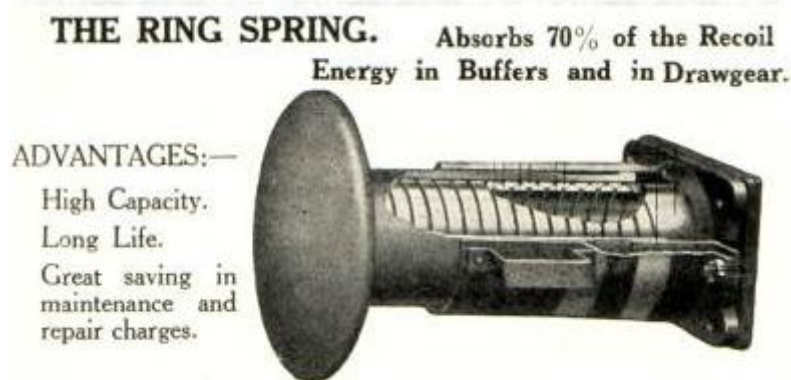


Ilustración 2. Amortiguador por muelle de Sir John Brown (6)

A partir de este momento, se comenzaron a mejorar estos sistemas entre vagones para fabricarlos a menor precio, pero no fue hasta 1855 cuando se comenzó a pensar en la utilización de sistemas de final de vía o toperas para el frenado y absorción del impacto. Los sistemas de amortiguación por muelle se combinarían más adelante con las toperas para absorber la energía de la colisión.



Ilustración 3. Topera de madera (6)

Las toperas no serían implantadas hasta finales del siglo XIX. Estas comenzaron siendo muy simples, en las que la utilización de madera predominaba dentro de los materiales utilizados, Ilustración 3, e incluso se llegaban a usar montones de tierra para la frenada (6). La utilización de estos sistemas de frenado provocó varios accidentes entre los que destacan el ocurrido en la estación de Ramsgate en el este de Reino Unido. En este accidente un tren no frenó lo suficiente y terminó colisionando con una pared de la estación cobrándose una vida (7). El accidente más importante sería el descarrilamiento provocado por la colisión entre un tren y una topera en la estación de Montparnasse de París. La locomotora colisionó con demasiada velocidad con la estructura del final de la vía provocando el descarrilamiento del tren y la aparatosa caída desde el primer piso de la estación, Ilustración 4 (8).



Ilustración 4. Accidente de Montparnasse (8)

Los accidentes que ocurrieron y la ineficiencia de las toperas para frenar los vehículos, provocaron que en 1910 se comenzaran a fabricar nuevos modelos de toperas con un nivel mayor de complejidad. Se diseñaron distintos tipos de toperas

entre las que destacan las fabricadas con hormigón y las primeras estructuras de acero, Ilustración 5 (6).



Ilustración 5. Topera de acero de 1910 (6)

El uso de estas toperas disminuyó el número de accidentes debidos a colisiones contra estructuras de final de vía. Los accidentes que sucedieron a principios del siglo XX se solucionaron con la fabricación de tres nuevos tipos de sistemas de frenado al final de la vía, las toperas de muelles, de fricción y las hidráulicas. Estas nuevas toperas permitían un cierto movimiento del tren tras la colisión, proporcionando una pequeña absorción de energía, Ilustración 6.



Ilustración 6. Topera de fricción (1913) (6)

Desde este momento hasta el día de hoy, la optimización de las toperas ha sido constante. La fabricación de toperas de fricción con un número mayor de frenos; sobre vías especiales de fricción e incluso mixtas; y con sistemas de muelles y fricción, son algunos ejemplos, Ilustración 7.



Ilustración 7. Topera actual con sistema de muelles y fricción (6)

2.2.2. Tipos de toperas ferroviarias

En este apartado se van a explicar las diferentes toperas que se utilizan en la actualidad. Algunas de ellas ya fueron mencionadas en el apartado anterior.

Toperas Fijas

Estas toperas ancladas en la vía son las más simples y se utilizan cuando no hay espacio suficiente para la implantación de un dispositivo de frenado de mejores características. Tras un impacto, estas toperas al estar fijas en la vía no sufren ningún tipo de desplazamiento.

- *Toperas simples*

Son el tipo de topera más antigua y son las primeras fijas usadas en las vías. Existen muchos diseños pero, básicamente, se componen de un bloque, generalmente de hormigón, y una parte metálica que es la que recibe el impacto directo del vehículo. Aunque estas toperas no son las ideales se siguen utilizando en una gran cantidad de vías del mundo. La ilustración 8 muestra un ejemplo de este tipo de topera.



Ilustración 8. Topera fija simple. Cortesía de H. J. Skelton and Co

El impacto a una velocidad considerable de cualquier vehículo contra este tipo de topera provoca una destrucción parcial o total de la estructura y por tanto, su inutilidad posterior. La estructura de hormigón o de metal tiene un tamaño considerable pues parte de la topera se encuentra debajo de las vías para proporcionar una mayor estabilidad del tren tras la colisión.

Estas toperas tienen una capacidad muy baja para absorber la energía cinética del tren, y con unos valores de desaceleración incómodos para los pasajeros, si los comparamos con otro tipo de toperas (9).

- **Toperas con amortiguador mecánico**

En este tipo de toperas se incluye un amortiguador mecánico que absorbe la energía y la convierte en fricción y calor. Estos amortiguadores, formados por muelles helicoidales, se colocan junto con la estructura y absorben la energía deformándose. Cuando los muelles se descomprimen liberan la energía absorbida como fricción y calor.

Las principales ventajas de este tipo de toperas son el poco espacio que ocupan, ya que no requieren más espacio detrás de la topera para la frenada del tren; no requieren mantenimiento, ya que solo se utilizan muelles para detener el vehículo y solo se deben sustituir cuando se dañen tras una colisión; y tienen bajo coste debido a que son sistema simple.

La sencillez de estos sistemas implica que su capacidad de absorción de energía es reducida y por ello, la selección de una topera con amortiguador mecánico depende de la vía. Las velocidades que se alcancen por un tren y su masa, serán directamente proporcionales a la resistencia que debe oponer el muelle si se tuviera que detener. Se deberá colocar una topera diferente para cada vía y así obtener un frenado óptimo.

- **Toperas con amortiguador hidráulico**

Los estudios realizados a mitad del siglo XX sobre el uso de aceites minerales comprimidos llevo a la fabricación de las primeras toperas con amortiguación hidráulica, donde la absorción de la energía cinética del tren se produce gracias al aumento de presión del aceite. Al igual que las anteriores toperas, esta absorción de energía está limitada (aunque es mayor que las toperas mecánicas) por el fluido y por el amortiguador utilizado y por lo tanto, se necesitarían diferentes toperas para proporcionar una mayor o menor disipación de energía en función de la vía. La ilustración 9 muestra una topera hidráulica.



Ilustración 9. Topera fija con amortiguador hidráulico (10)

La eficacia de estos sistemas es muy alta, pues se consigue una disipación de energía por estos sistemas de casi del 100% y proporcionan una desaceleración cómoda para los usuarios del vehículo, siendo constante desde el inicio del impacto hasta la detención final del tren. El mantenimiento necesario es debido a las fugas de fluido en las partes que forman la topera. En algunos casos las prestaciones

permanecen intactas durante más de 15 años. Aunque este tipo de toperas es muy común en las vías ferroviarias, el alto coste de estos sistemas de absorción es su principal desventaja (6).

En la ilustraciones 10, 11 y 12 se muestran las tres fases de absorción de energía en un amortiguador gas-hidráulico fabricado por Llalco. La Ilustración 10 representa el amortiguador en reposo donde las presiones de la cámara de gas y aceite son iguales. El aceite está situado en dos cámaras. El caudal de aceite que fluye de una a cámara a otra se controla gracias a un eje dosificador con forma de tronco cónico. Este caudal variable con el tiempo ayuda a conseguir unas desaceleraciones en el vehículo constantes, aumentando la eficiencia del amortiguador.

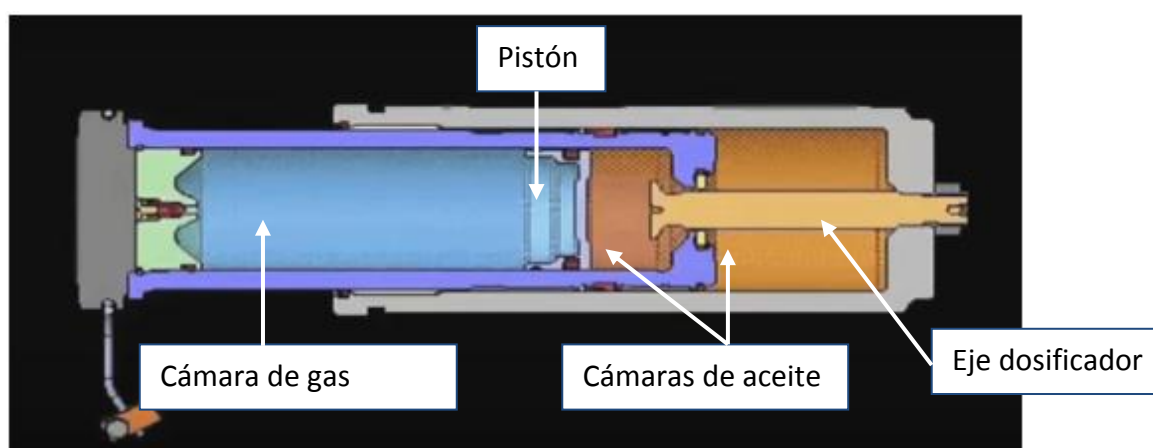


Ilustración 10. Amortiguador hidráulico. Posición de reposo (10)

La ilustración 11 muestra un instante intermedio del amortiguador en el que se está absorbiendo la energía del impacto. En este caso, y provocado por la colisión, parte del aceite se ha desplazado de cámara y ha aumentado su presión desplazando el pistón que separa el gas del fluido y comprimiendo el gas.

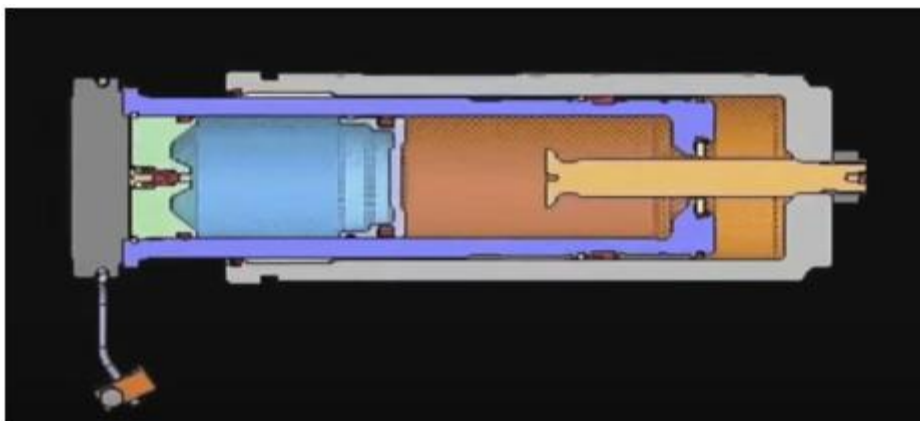


Ilustración 11. Amortiguador hidráulico. Posición intermedia (10)

En la última fase del movimiento del amortiguador, Ilustración 12, se observa como todo el aceite se ha cambiado de cámara y el gas se ha comprimido al máximo permitido por este amortiguador. A partir de este momento se supone que el vehículo se ha frenado por completo y comenzaría el mismo proceso al contrario, con un movimiento del tren en dirección opuesta hasta que el amortiguador vuelva a la posición de equilibrio, Ilustración 10. (10)

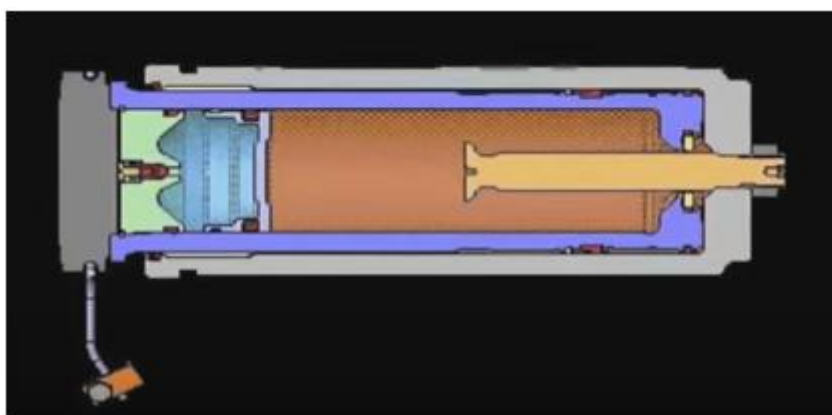


Ilustración 12. Amortiguador hidráulico. Posición intermedia (10)

Toperas de fricción

Este tipo de toperas disipan la energía cinética por medio de la fricción de unas zapatas instaladas en la topera y montadas sobre los raíles de la vía. En la colisión, la estructura recibe el impacto y se desplaza en la dirección del movimiento hasta su detención final gracias a la disipación de energía que se produce debida al rozamiento de las zapatas de fricción con los raíles. La ilustración 13 muestra una topera de fricción y las zapatas de fricción colocadas sobre la vía.



Ilustración 13. Toperas de fricción (6)

Las capacidades de este tipo de toperas son mayores en comparación con los otros tipos ya comentados, pues utilizan la estructura y parte de la vía para disipar la energía cinética del tren. Las principales ventajas de las toperas de fricción son las siguientes:

- Alta capacidad de absorción de energía, limitada por las dimensiones disponibles de vía. Dependiendo del vehículo, si fuera necesario una mayor capacidad de frenado se podrían instalar zapatas adicionales detrás de la

topera e incluso un número mayor de raíles de refuerzo para añadir más zapatas al sistema de frenado.

- La vida útil es alta y las operaciones de mantenimiento se limitarían a las piezas que sufran daños por desgaste.

Las toperas de fricción aun teniendo unas características buenas respecto a otras toperas tienen dos desventajas:

- Espacio adicional. Como ya se ha comentado para el correcto funcionamiento de las toperas de fricción se necesita un espacio detrás de la topera.
- Altos costes. La fabricación, instalación y mantenimiento de estos tipos de toperas es alto ya que es necesario una gran precisión a la hora de colocar las zapatas y cualquier fallo en este proceso podría provocar una pérdida de eficiencia. (6)

- **Toperas de fricción sin elementos amortiguadores**

Este tipo de toperas operan únicamente por el efecto de la fricción de las zapatas con los raíles. La ilustración 14 refleja una topera de este tipo.



Ilustración 14. Topera de fricción sin elementos amortiguadores (6)

- **Toperas de fricción con elementos amortiguadores**

Estas toperas utilizan el efecto de los amortiguadores descritos para las toperas fijas y así conseguir un aumento de su capacidad de disipación de la energía. Los

amortiguadores pueden ser mecánicos e hidráulicos dependiendo de las necesidades. La ilustración 15 muestra una topera de fricción con un amortiguador hidráulico.



Ilustración 15. Topera de fricción con amortiguador hidráulico (11)

- Toperas especiales

Si la instalación de las toperas ya citadas fuera imposible por problemas de espacio, se podrían instalar unos sistemas de frenado aplicados directamente a las ruedas del tren. Estas toperas se utilizan para controlar la velocidad o en situaciones de emergencia.

Existen tres tipos de toperas especiales:

El primer tipo es el que utiliza una pequeña zapata colocada en el raíl para detener el vehículo, ilustración 16.



Ilustración 16. Topera con zapata (6)

Otro tipo de toperas especiales son las de descarrilamiento controlado. Este tipo es utilizado como emergencia si no se pudiera frenar el vehículo mediante otro método.

El dispositivo, Ilustración 17, provoca el descarrilamiento del tren a una baja velocidad sin volcar, elevando la rueda y moviéndola hasta dejarla caer fuera del raíl.



Ilustración 17. Topera de descarrilamiento controlado (12)

Por último, las toperas reductoras de velocidad o *Dowty retarders*, Ilustración 18, cuya función es disminuir la velocidad e incluso detener el vehículo. Estos elementos situados junto al raíl, presionan las ruedas gracias a cilindros hidráulicos incorporados en cada elemento, según circula el tren por encima, y consiguen disminuir su velocidad debido a la resistencia mecánica que ejercen.



Ilustración 18. Topera de descarrilamiento controlado (13)

2.3. Elección del material de absorción de energía

Las estructuras convencionales están fabricadas con materiales muy diferentes a las estructuras de absorción de energía. Estas últimas estructuras deben ser fabricadas con materiales dúctiles que sean capaces de deformarse sin que se produzcan fisuras. Las aleaciones de aluminio o los aceros de bajo contenido en carbono son algunos de los materiales utilizados para su fabricación.

Introducción al aluminio

En la actualidad el aluminio es uno de los materiales más utilizados. El crecimiento de su uso en los últimos años ha sido exponencial en la fabricación de todo tipo de elementos dentro de la industria ya que ofrece unas características destacadas como su fácil conformado, alta resistencia frente a la corrosión, es ligero, resistente y 100% reciclable, Ilustración 19, (14).

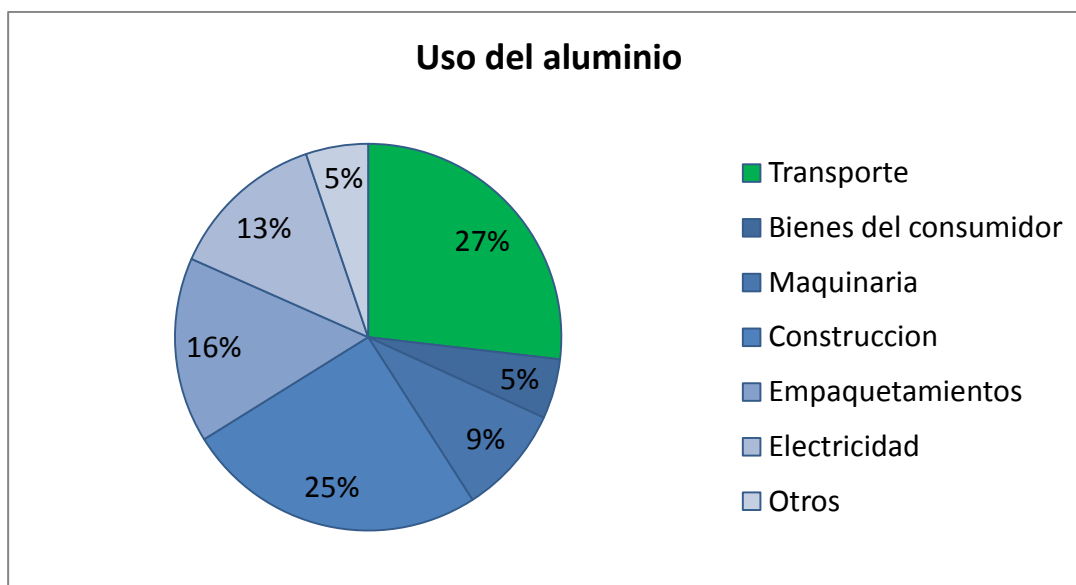


Ilustración 19. Situación del uso de aluminio (14)

En la industria del transporte, el aluminio es uno de los metales que mejores propiedades proporciona ya que su ligereza y su resistencia establecen unos límites que otros metales no puede aportar. Las estructuras fabricadas con aluminio tienen unas ventajas que se muestran a continuación:

Durabilidad y sostenibilidad

El aluminio es un metal en su totalidad reciclable y tiene una alta resistencia frente a la corrosión. Esto hace que la vida útil de las estructuras fabricadas en este material aumente con respecto a las fabricadas con acero.

La alta reciclabilidad del aluminio se ve reflejada en que más del 75% del aluminio producido desde el año 1888 está en uso en la actualidad ahorrando una gran cantidad de CO₂ en emisiones tanto en la extracción como en la producción. Todo ello hace el

uso del aluminio idóneo para la fabricación de cualquier estructura que quiera ser respetuosa con el medioambiente. (14)

Eficiencia

La gran capacidad de absorber energía cinética por unidad de masa provoca que el uso de estructuras de aluminio en vez de acero, suponga un alto ahorro de peso en el vehículo y, por tanto, el uso de menos combustible y una reducción de las emisiones.

La reducción del peso permite también la posibilidad de fabricar vehículos que tengan mayores velocidades con un mayor control de la frenada y aportando una mayor comodidad a los ocupantes de los mismos, Ilustración 20 (15).

<i>Vehicle</i>	<i>Steel weight (kg)</i>	<i>Aluminium weight (kg)</i>	<i>Weight saving (%)</i>
Pontiac Fiero	444	303 ^a	32
Ferrari 408	99	68	31
BL Metro	137	74 ^a	46
Bertone X1/9	192	130 ^a	33
Honda NSX	350	210	40
Medium-volume saloon ^b	262	138	48
Medium-high-volume saloon ^b	170	101	41
Low-volume sports soft top ^b	340	213	37

^a Weight of aluminium replica of production vehicle.

^b Current development projects.

Ilustración 20. Reducción de peso según el material utilizado en tanto por ciento

Capítulo III. Metodología

3. Metodología

3.1. Propiedades del Aluminio 1100-H12 y Modelo de endurecimiento

Los modelos que van a ser estudiados son diseños tubulares de aluminio 1100-H12. Los aluminios 1XXX presentan una pureza de casi el 100% siendo el hierro y el silicio sus dos impurezas más importantes de la aleación, (16). El resto de materiales que componen esta aleación son los siguientes, Tabla 3:

Tabla 3. Composición del aluminio 1100-H12 en porcentajes

Composición del Aluminio 1100						
Peso	Al	Cu	Si + Fe	Mn	Zn	Otros
1100	Restante	0.05-0.02	0.95 max	0.05 max	0.10 max	0.05 (cada uno) 0.15 (En total)

Siguiendo estudios realizados (17), sobre la resistencia de placas delgadas al impacto de proyectiles y el uso del aluminio 1100-H12 como material para absorber energía, todas las partes del presente proyecto se realizarán con este material, que presenta las propiedades recogidas en la Tabla 4 y un modelo de endurecimiento según Johnson-Cook (2):

Tabla 4. Propiedades del aluminio 1100-H12

Propiedad [unidades]	Valor
Densidad [kg/m^3]	2700
Módulo de elasticidad [Pa]	65.76 E9
Coefficiente de Poisson [Pa]	0.3
Límite elástico [Pa]	148.36 E6
B [Pa]	345.51 E6
n	0.183
Velocidad de deformación de referencia [s^{-1}]	1.0
C	0.0001
m	0.859
Temperatura de fusión [K]	893
Temperatura de referencia [K]	293
Calor específico [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]	920

Coeficiente de Taylor-Quinney	0.9
d1	0.071
d2	1.248
d3	-1.142
d4	0.0097
d5	0.0

Ley de Hooke generalizada 3D

La ley de Hooke generalizada caracteriza el comportamiento de un sólido lineal e isotrópico, y tiene la siguiente expresión (1):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2G + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2G + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Modelo de endurecimiento Johnson-Cook

Una ecuación constitutiva se define como la ley que representa cómo se comporta un material termodinámica y mecánicamente cuando se le aplica una carga externa, (18).

Esta ley propuesta por Johnson-Cook para caracterizar el comportamiento de materiales frente a impacto tiene la siguiente expresión:

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T - T_{melt}} \right)^m \right) \quad (2)$$

Se basa en la definición de la tensión en función de la deformación, velocidad de deformación y de la temperatura. Si se analiza la ecuación, esta tiene tres partes que describen como varían las tres variables de las que depende la tensión.

La primera parte describe el proceso de deformación:

$$\sigma_y^1(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = (A + B\varepsilon_p^n) \quad (3)$$

Siendo:

- σ_y la tensión

- A el límite elástico del material
- B y n indican el efecto del endurecimiento del material
- ε_p la límite plástico equivalente

La segunda parte de la ecuación define la tensión en función de la velocidad de deformación:

$$\sigma_Y^2(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (4)$$

Siendo:

- σ_Y la tensión
- C la sensibilidad a la velocidad de deformación
- $\dot{\varepsilon}_p$ la velocidad de deformación plástica del material
- $\dot{\varepsilon}_0$ la velocidad de deformación de referencia del material

La última parte describe la tensión en función del aumento de temperatura:

$$\sigma_Y^3(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T - T_{melt}} \right)^m \right) \quad (5)$$

Siendo:

- σ_Y la tensión
- T_0 la temperatura de referencia
- T_{melt} la temperatura de fusión del material
- m la sensibilidad del material al aumento de temperatura

Modelo de daño de Johnson-Cook

Para poder analizar correctamente la simulación del modelo, se define el criterio de fallo del material según Jonhson-Cook (5) y (6):

$$\omega = \Sigma \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f^f} \right) \quad \text{Fallo para } \omega = 1 \quad (6)$$

Siendo:

- ω parámetro de acumulación de daño
- Σ la tensión hidrostática

$$\varepsilon_p^f(\dot{\varepsilon}_p, T, \Sigma, \bar{\sigma}) = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{\Sigma}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_0}{T - T_{melt}} \right) \right] \quad (7)$$

Siendo:

- d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 los coeficientes de daño

3.2. Variables de interés y caracterización del Impacto

Para el estudio de una colisión o un impacto se debe tener en cuenta la resistencia frente a colisiones o *crashworthiness*. Esta indica la capacidad de una estructura, o cualquiera de sus componentes, de proteger a los ocupantes de un vehículo en una colisión (19). La resistencia frente a colisiones tiene en cuenta los diferentes factores que afectan en una colisión y estos se definen a continuación.

Fuerzas y aceleraciones en la colisión

En el impacto de una estructura contra otra se generan grandes reacciones y aceleraciones, Ilustración 21. En la ilustración 21 se muestra la reacción inicial en el instante inicial del impacto, F_{min} , con su correspondiente aceleración mínima representada en la Ilustración 22, a_{min} . Esta reacción usualmente es la más alta en valor absoluto de todo el ensayo. El valor obtenido es muy importante a la hora de analizar la estructura, ya que uno de los objetivos del problema propuesto es reducir este pico de fuerza y en consecuencia el valor de la aceleración. Los valores medios de carga y de aceleración son también utilizados para estudiar el rendimiento de la deformación. Variaciones altas de aceleración podrían significar una deformación irregular de la estructura en forma de pandeos, y por tanto una pérdida de eficacia del modelo.

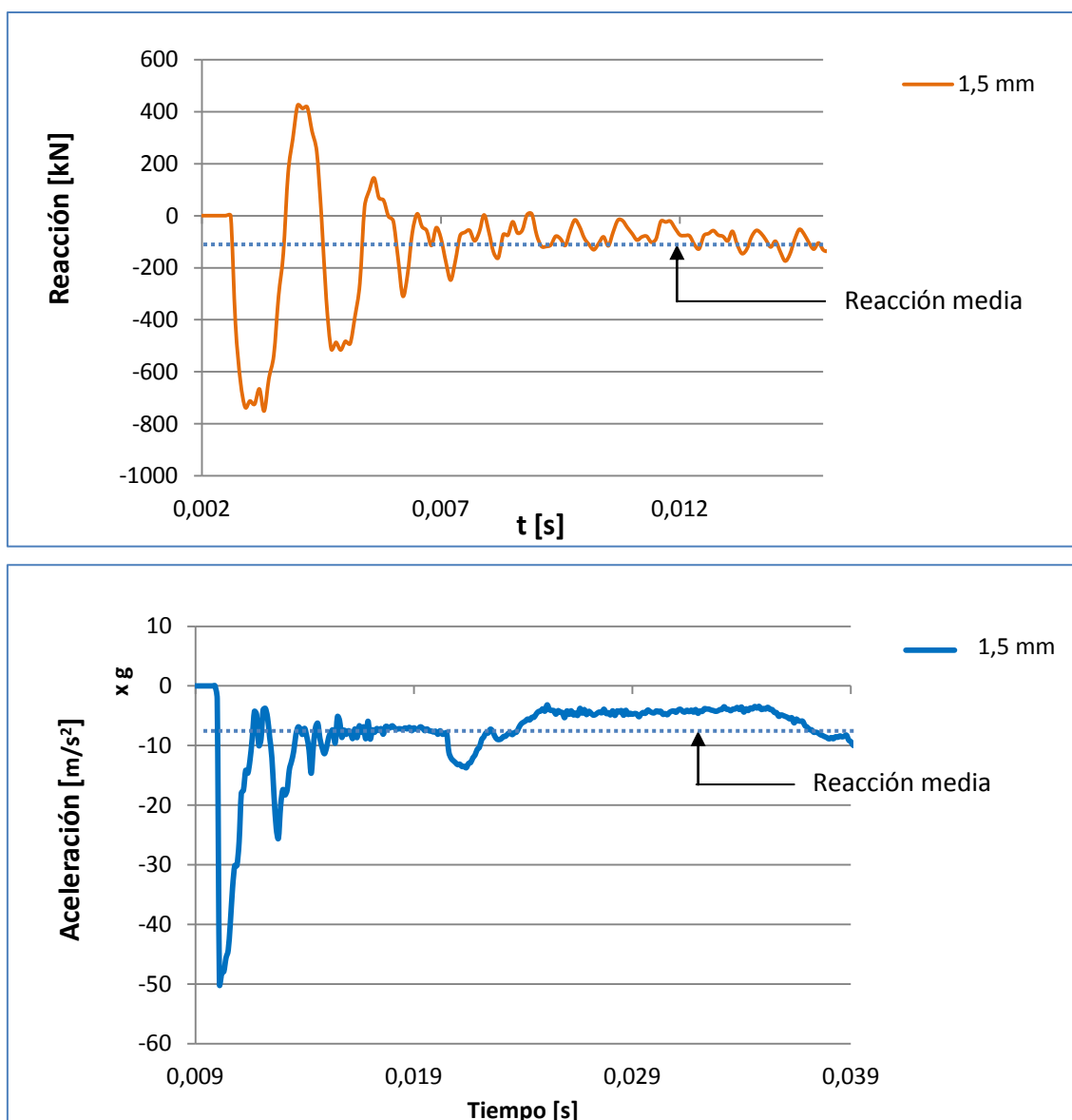


Ilustración 21. Reacción y aceleración vs. Tiempo. Tubo de sección cuadrada de espesor 1.5 mm

Longitud deformada máxima (ΔL)

La disminución de la longitud del modelo inicial es una variable que se va a tener en cuenta a la hora de realizar el análisis de los resultados. Es conveniente que la deformación producida sea la máxima posible sin que la estructura llegue al colapso para así aprovechar mejor el material utilizado.

Energía cinética absorbida (E)

La energía del modelo se calcula según la ley de la energía cinética dadas las condiciones iniciales de impacto del problema. Por lo tanto, todos los modelos que se

analicen en el presente trabajo tendrán que disipar la misma cantidad de energía cinética.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = 112500 J \quad (8)$$

Energía específica

Como ya se ha explicado, los modelos van a tener que disipar la misma cantidad de energía. Se define entonces la energía específica como la energía absorbida por los modelos entre la masa total deformada del ensayo en cuestión.

$$E_e = \frac{E}{\frac{\Delta L}{L} \cdot m} \quad (9)$$

Siendo:

- E_e la energía específica
- E la energía total del sistema (8)
- $\frac{\Delta L}{L}$ el porcentaje de longitud deformado
- m la masa del cuerpo

Capacidad de absorción de la estructura

Esta variable está relacionada con la energía cinética disipada y la longitud deformada máxima. Y se define como el coeficiente entre la energía y la longitud deformada de la estructura.

$$Ca = \frac{E}{\Delta L} \quad (9)$$

Siendo:

- Ca la capacidad de absorción de energía del modelo
- E la energía total del sistema (8)
- ΔL la longitud deformada

3.3. Modelado del problema de impacto

Este apartado constará de 2 partes, la primera será una breve introducción al método de los elementos finitos, los puntos más destacados y su modo de realizar los

análisis. La segunda, la utilización de un software de elementos finitos (Abaqus) y sus diferentes módulos para resolver problemas, junto con un ejemplo para ilustrar estos apartados.

3.3.1. Introducción al Método de Elementos Finitos

Conocido también como MEF, el método de elementos finitos se utiliza para realizar análisis ingenieriles por ordenador. El MEF se basa en la subdivisión de un medio continuo en un gran número de elementos, como piezas de una estructura, para más tarde reconectarlas con nodos de unión. La principal diferencia entre la estructura inicial y la reconstruida a partir del método MEF es el número de grados de libertad. Mientras que la estructura inicial tiene un número infinito de grados de libertad, la creada mediante el MEF tiene un número finito de grados de libertad, de ahí su nombre. A esta división se denomina discretización, Ilustración 22. Para obtener la solución de este nuevo modelo se resuelve un sistema de ecuaciones formado por todas las propiedades y condiciones de contorno del problema (20).

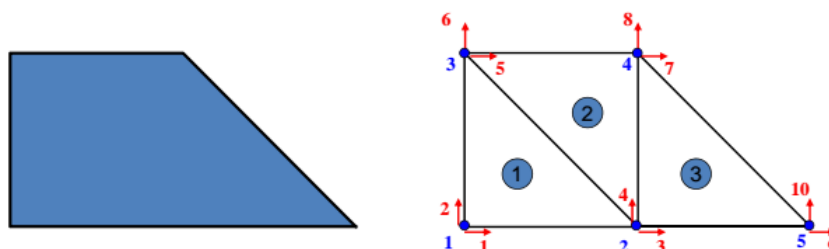


Ilustración 22. Discretización de un modelo simple. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M

Para hacer un cálculo ingenieril por el MEF es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones:

En primer lugar, es necesario construir el modelo de elementos finitos. Dadas unas condiciones del cuerpo a estudiar, se tendrá que seleccionar el tipo de elemento y definir sus propiedades.

Los modelos de análisis de este proyecto son no lineales y esto es debido a que las geometrías que se forman en el proceso de deformación son muy complejas, Ilustración 23.



Ilustración 23. Deformación de un tubo de sección fina cuadrada

Dependiendo de la geometría de la estructura se utilizan diferentes tipos de elementos, Ilustraciones 24, 25 y 26

- Elementos de 1 dimensión, Ilustración 24.







Elementos BARRA (TRUSS element)	  dos nodos  tres nodos
Elementos VIGA (BEAM element)	  dos nodos  tres nodos

Ilustración 24. Elementos 1D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M

- Elementos de 2 dimensiones, Ilustración 25.

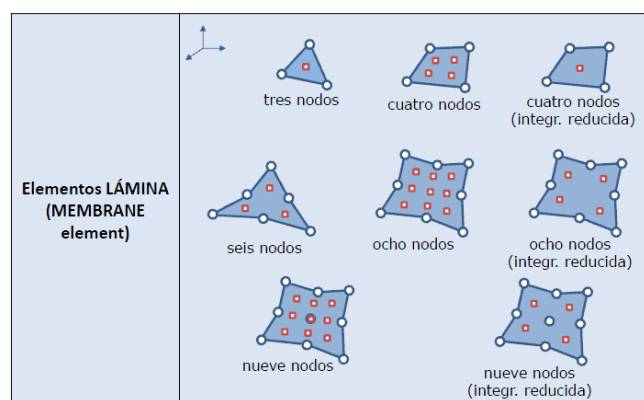
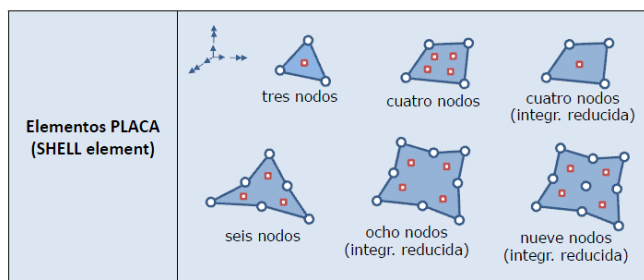


Ilustración 25. Elementos 2D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M

- Elementos de 3 dimensiones, Ilustración 26.

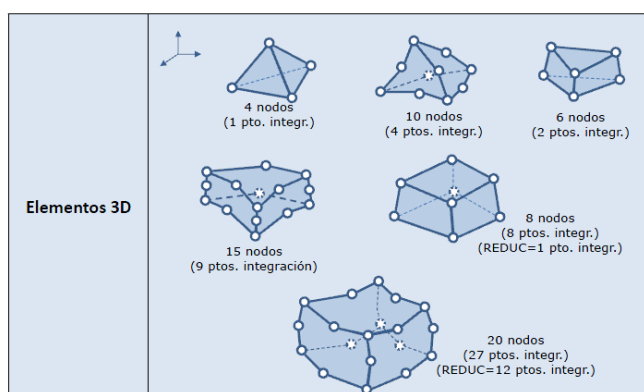


Ilustración 26. Elementos 3D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M

Es conveniente que la división de la estructura sea coherente con el problema. Así se definirán nodos en los puntos del cuerpo donde existan fuerzas puntuales y el tamaño de los elementos tendrá que ser más pequeño si en una zona se prevén variaciones grandes en las variables. La definición del tamaño de los elementos y del

número de nodos, se conoce como densidad de malla. En este proyecto se estudiarán los diferentes modelos con diferentes densidades de malla para alcanzar una solución precisa. Según (19) los modelos con muchos elementos tienden a sobrepredecir los resultados, y en concreto, en estudios de impacto sobre tubos las deformaciones obtenidas experimentalmente serán menores a las alcanzadas por el método de elementos finitos.

3.3.2. Abaqus y Módulos utilizados

Como ya se ha mencionado, el programa que va a ser utilizado para la resolución del problema planteado es Abaqus 6.14, una herramienta de *Dassault Systèmes* que permite obtener soluciones de problemas ingenieriles de diferente tipo. El programa se estructura en módulos que son las diferentes partes que forman el software y se definen a continuación con un pequeño ejemplo para mostrar su utilización dentro de este proyecto:

Módulo Part

Es el módulo utilizado para crear la geometría de la estructura. Se trata de una herramienta CAD (*Computer-Aided Design*) que permite trabajar en una, dos o tres dimensiones, con elementos *solid*, *shell*, *wire* o *point* (según nomenclatura Abaqus), para crear por extrusión, revolución, barrido o por coordenadas cualquier estructura. Las estructuras pueden ser tanto rígidas como deformables y se pueden importar desde otros programas de modelado sólido.

Aplicación al ejemplo

A modo de ejemplo, se va a realizar el estudio de un impacto con las condiciones de contorno ya descritas en el apartado 2. En primer lugar, las estructuras que forman el modelo son dos placas rígidas, una fija y otra móvil que representan la parte empotrada de la topera y el tren en movimiento, y una estructura deformable con forma de tubo de espesor fino. La Tabla 5 muestra las dimensiones que serán utilizadas para este ejemplo.

Tabla 5. Dimensiones utilizadas para el caso de ejemplo

Elemento	Dimensión	Valor [m]
Tubo	Longitud	2
	Radio	0.3
	Espesor	0.0015
Placa	Ancho	1
	Alto	1
	Espesor	0.0015

Para la realización del diseño, y ya que el espesor de las partes que forman el modelo es muy pequeño en comparación con las demás dimensiones, se va a hacer uso de elementos tipo *shell*. El cilindro hueco se realizará mediante extrusión y las dos placas serán estructuras cuadradas en dos dimensiones.. La Ilustración 27 muestra ambas partes del modelo.

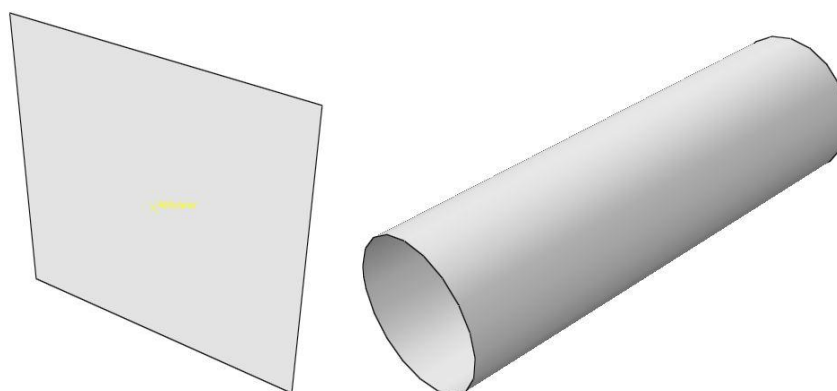


Ilustración 27. Estructuras tras el uso del módulo Part

Módulo Property

Este módulo permite configurar los materiales que se usarán en la simulación. Las propiedades que pueden ser incluidas en este apartado son muy variadas e incluyen densidades, propiedades mecánicas (elásticas, plásticas o de daño), propiedades

térmicas y eléctricas o magnéticas. Dentro de las propiedades mecánicas existe la opción de seleccionar si el material es isótropo, si sigue un modelo matemático como el de Johnson-Cook, etc.

Aplicación al ejemplo

En primer lugar se configura el material, el aluminio 1100-H12. La Ilustración 28 muestra las propiedades introducidas para este material.

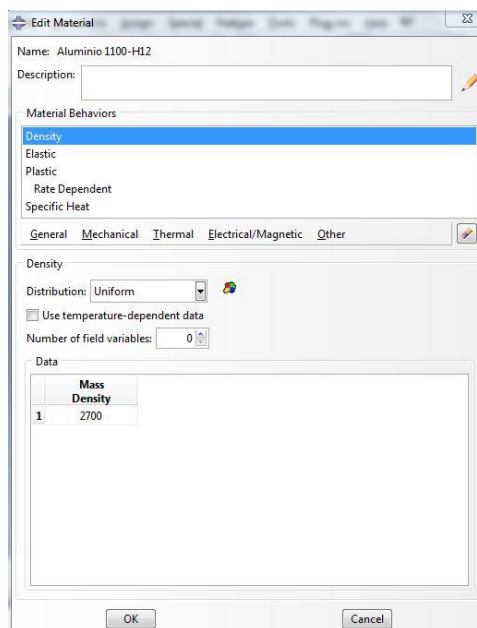


Ilustración 28. Propiedades del Aluminio 1100-H12. Unidades en el sistema internacional

En segundo lugar, se deben definir las distintas partes de la estructura por medio del uso de una entidad propia del software denominada sección. En este caso, las secciones han de ser tipo *shell* y con el espesor elegido, por ejemplo 1.5 mm, Ilustración 29.

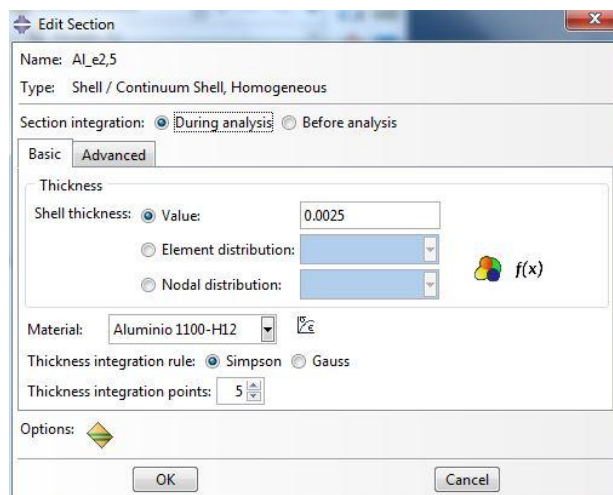


Ilustración 29. Creación de la sección

Por último, se debe asignar la sección. En el menú que aparece en pantalla se ha de seleccionar el material y la dirección en la que se definirá el espesor, Ilustración 30.

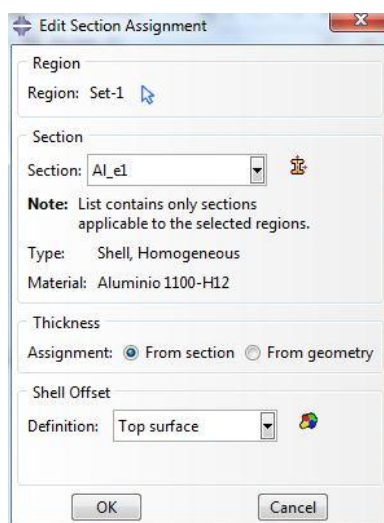


Ilustración 30. Asignación de la sección

Módulo Assembly

El tercer módulo se utiliza para la unión y colocación de todas las partes creadas. Las estructuras que se van a ensamblar de manera que estén una junto a la otra. Para ello, las piezas se pueden rotar, trasladar e incluso cortar partes ya creadas para añadirlas al módulo directamente, sin tener que hacerlas desde el módulo *part*.

Aplicación al ejemplo

En el módulo *assembly* se van a añadir las tres partes creadas. Estas tienen que ser independientes para luego poder mallarlas en el módulo *mesh* desde el propio modelo ensamblado. En este caso, las estructuras no se han rotado, únicamente se han desplazado y unido, la Ilustración 31 muestra el resultado tras la unión y/o el desplazamiento de las partes.

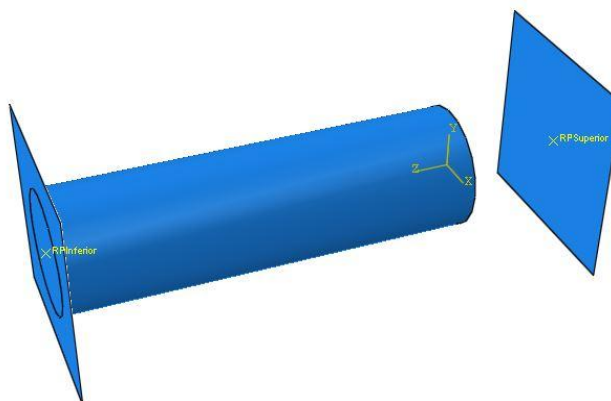


Ilustración 31. Ensamblaje de las partes creadas

Módulo Step

En el módulo *Step* se crean los momentos que van a ser relevantes en la simulación. En este módulo además se solicitan los resultados que se requerirán para el análisis final.

Aplicación al ejemplo

En el caso que se está realizando de ejemplo, se crea un *Step 1* de 0.3 segundos de duración que representa el tiempo del impacto, de tipo dinámico y explícito por ser a gran velocidad. Todo lo mencionado con anterioridad se muestra en la Ilustración 32.

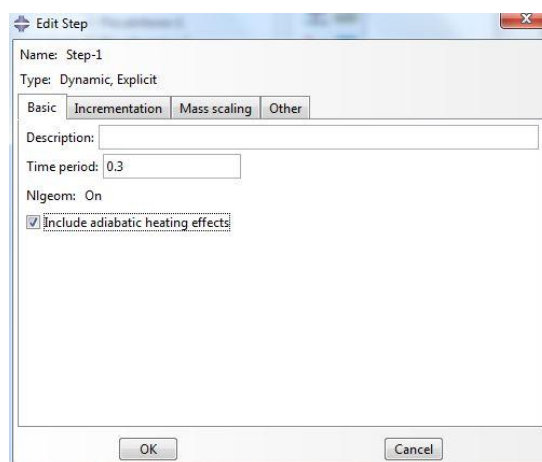


Ilustración 32. Step del ejemplo

Antes de pasar al siguiente módulo, se deben seleccionar las variables que se necesitan para el análisis de la estructura, *Field* y al *History Output*.

Con el *Field Output* se obtendrán los resultados de todo el modelo de las variables que se escoja. El *History Output* mostrará los resultados de las variables elegidas en puntos concretos para caracterizar una zona de la estructura. Para el estudio correcto de una estructura se debe crear un *Field Output* con pocos intervalos de tiempo a lo largo de toda la colisión, y un *History Output* más preciso y con más intervalos de tiempo para los puntos relevantes.

En el *Field Output* se escogen 100 intervalos de tiempo con las variables que tiene el programa por defecto (Fuerzas, esfuerzos, desplazamientos, velocidades, contactos y energías).

El *History Output* aportará 3 resultados obtenidos durante la colisión en 5000 intervalos de tiempo, el primero recogerá los resultados de la reacción en el punto medio de la placa fija, el segunda es uno común para todo el modelo donde se recogen los valores de energía total, y el último que incluye las variables de desplazamiento, velocidad y aceleración del vehículo, representado por la placa móvil y medidos en el punto medio de dicha placa. La Ilustración 33 muestran los diferentes *Outputs* que se van a analizar en los modelos.

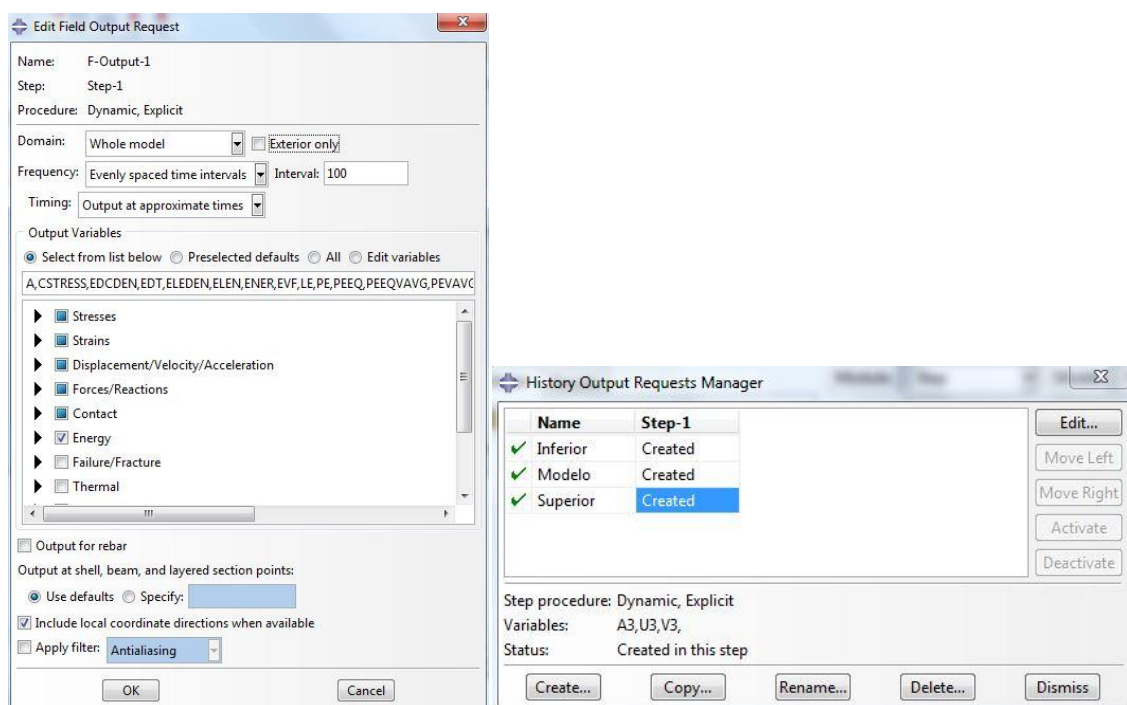


Ilustración 33. Field y History Output

Módulo Interaction

Este módulo es el encargado de asignar las interacciones que se van a producir en la simulación, estas interacciones puede tener origen mecánico como la propia fricción, térmico como la generación de calor, o eléctrico como la conductancia, entre otras.

Los contactos existentes en los problemas de origen mecánico se definen con un comportamiento tangencial adecuado para el contacto entre materiales que depende por la fricción, y un comportamiento normal que permite una separación de las estructuras si se cumplieran las condiciones necesarias para que esto ocurriese. Otra interacción clave en diferentes problemas es la unión entre los elementos. En el caso de elementos soldados se necesitan definir las uniones entre elementos para que estos no se desplacen o giren por las condiciones del problema.

Aplicación al ejemplo

En este ejemplo, en primer lugar, se va a crear una interacción de contacto de origen mecánico con unas propiedades de comportamiento tangencial y un coeficiente de fricción de 0.3, además de las características de un comportamiento normal como ya se comentó anteriormente.

En este módulo además del contacto entre estructuras se tienen que definir las partes que estén soldadas y así conseguir que no se separen o se desplacen durante la colisión. Es por ello que se tiene que crear uniones en los puntos donde coincide el tubo con la placa fija.

Módulo Load

El módulo *Load*, es la herramienta que permite la creación de cargas, condiciones de contorno o campos predeterminados que tenga el problema, como la velocidad.

Aplicación al ejemplo

En el caso del ejemplo, se imponen las condiciones de contorno que se explicaron con anterioridad en el apartado 1.3. Las dos placas tienen dos funciones diferentes, la fija a la que está empotrada el tubo tiene una condición de contorno tipo *encastre* (Empotramiento) que no permite ningún desplazamiento o rotación, en cambio, la móvil tiene permitido solo el desplazamiento en el eje Z o el eje de la colisión.

En este módulo, se ha de imponer la condición inicial que tiene el tren, la velocidad, que se añade al programa como un campo predeterminado uniforme de velocidad de 15 m/s en el eje Z, en el punto medio de la placa móvil.

Módulo Mesh

El mallado de la estructura es una parte importante a la hora de resolver el problema. El software permite escoger las diferentes formas y tamaños de los elementos que compondrán el modelo. Es importante destacar, que los tamaños de los elementos dependen de cada estructura y por tanto, cada modelo se realizará con una densidad de malla diferente para alcanzar soluciones adecuadas.

Aplicación al ejemplo

Para el mallado del tubo simple del ejemplo se han elegido elementos cuadrados de tamaño 0.02 m tipo explícito. Sin embargo, las placas fija y móvil no sufren ningún cambio en su estructura por lo que el tamaño de los elementos que las forman es irrelevante, en este caso se ha elegido un tamaño de malla de 1 m, es decir un solo elemento. La ilustración 34 muestra la malla del modelo ensamblado.

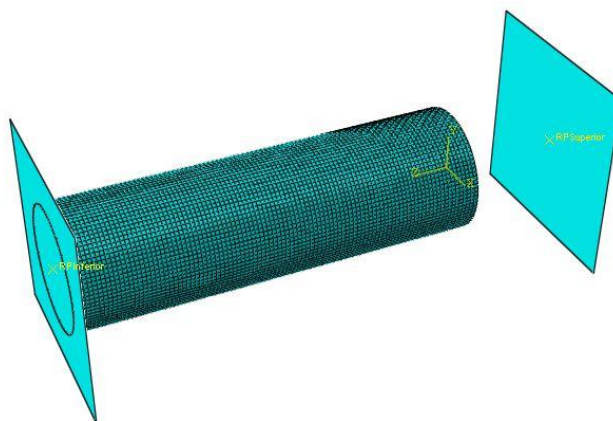


Ilustración 34. Mallado del ejemplo

En el caso de una estructura más compleja se realizaría un mallado más fino en zonas de la estructura que se prevean de interés.

Módulo Job

Este módulo permite la creación y monitorización de las simulaciones, el estado de cada análisis se muestra mediante el *Job Manager*, en el que existen varios estados: *running* (en funcionamiento), *completed* (completado), y el *terminated* (terminado) los más importantes. Los errores que ocurran durante el proceso de simulación también serían advertidos en esta ventana. Si existieran avisos o *warnings* el programa seguiría funcionando pero si estos fallos fueran irreversibles el estado pasaría a *Aborted*, o abortado. La Ilustración 35 muestra alguno de los ejemplos mencionados.

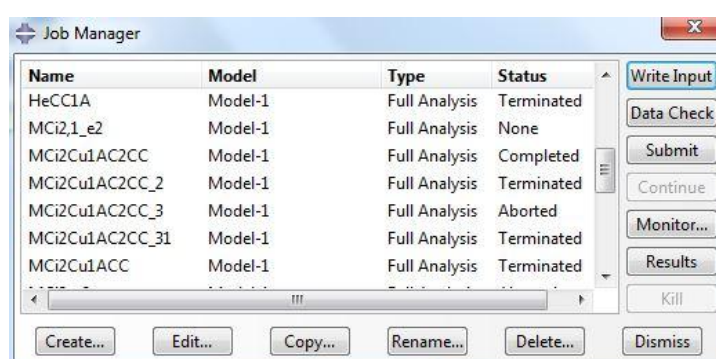


Ilustración 35. Job Manager

Módulo Visualitation

Una vez finalizado el análisis se comprueban los resultados obtenidos gracias al último módulo, el de visualización. En este módulo se comprueban las deformaciones

que suceden en cada problema y mediante un código de colores se muestran los resultados de cada variable solicitada en el apartado *Field Output* para cada intervalo de tiempo. Este modulo también permite animar estos cambios en el modelo para observar cómo se producen, e incluso realizar cortes para poder ver los resultados de manera más precisa. La Ilustración 36 muestra la tensión de Von Mises para diferentes tiempos de la estructura.

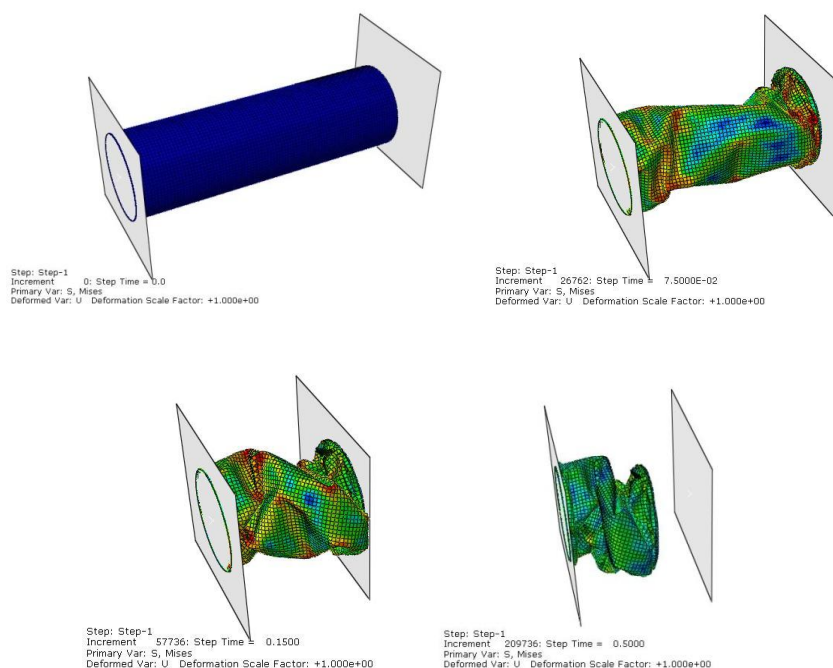


Ilustración 36. Tubo circular deformado para 0, 0.075, 0.15 y 0.5 segundos

La Ilustración 37 muestra una grafica de los resultados de desplazamiento obtenidos en la placa móvil con el tiempo.

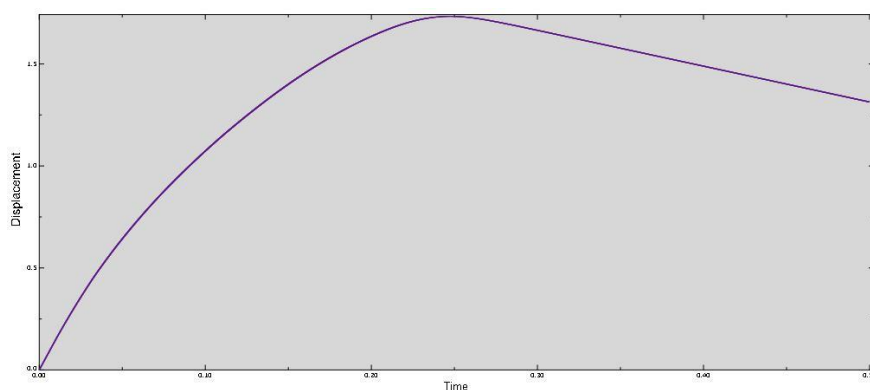


Ilustración 37. Desplazamiento vs. Tiempo. Placa móvil del ejemplo

Capítulo IV. Resultados y Análisis

4. Resultados y análisis

4.1. Introducción

Para encontrar el diseño óptimo de una estructura de absorción de energía en una vía terminal se va a dividir el proyecto en diferentes apartados: los estudios de sensibilidad de la malla, los análisis de estructuras de sección básica, los análisis de estructuras de diferente espesor y los estudios de modelos multitubulares. Todos ellos en conjunto aportarán los datos necesarios para la simulación de estructuras más complejas y por último, del modelo final.

La primera fase de diseño consistirá en el análisis de un tubo simple empotrado a una placa fija que sufre la colisión de una segunda placa móvil por su extremo libre. El tubo está fabricado de aluminio 1100-H12, con longitud preestablecida de 2 m y una geometría tal que el radio de la circunferencia circunscrita sea de 0.3 m. En el caso de ser un tubo de sección circular su radio será de 0.3 m, ajustándose así a las posibles dimensiones del modelo final a estudiar, Ilustración 38. Todas las condiciones de contorno son las ya establecidas en el apartado 1.3, al igual que el aluminio utilizado 2.3.

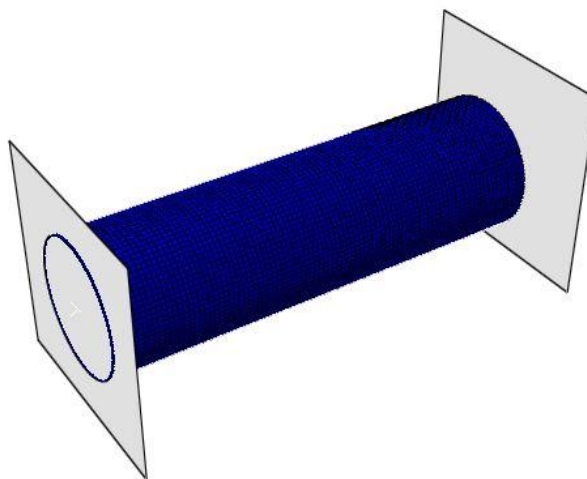


Ilustración 38. Modelo cilíndrico simple

En la segunda fase, se van a estudiar los modelos básicos con una serie de agujeros e incorporaciones para que solucionen algunos de los problemas encontrados en la primera fase, Ilustración 39. Los problemas encontrados fueron de rigidez, y de

aceleraciones y fuerzas, ya que se ponía en peligro la confortabilidad de los ocupantes del vehículo ferroviario.

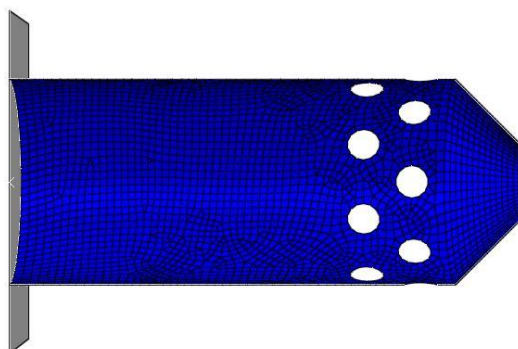


Ilustración 39. Modelo cilíndrico con tronco de cono y agujeros en la parte frontal

En la tercera fase, se diseñarán unos modelos con secciones formadas por varios tubos de sección básica, Ilustración 40, con una geometría tal que las dimensiones de su sección no superen a los establecidos por la circunferencia de 0.3 m de radio.

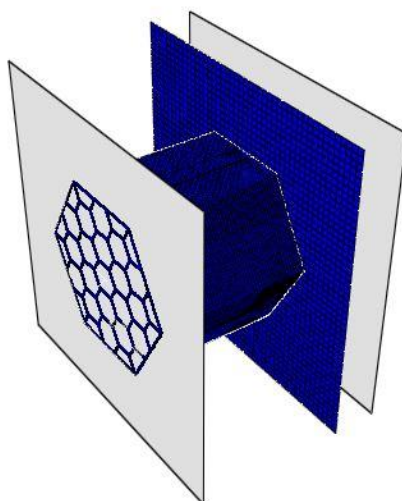


Ilustración 40. Modelo multitubular hexagonal. Forma de Panal.

Por último, en la fase final se estudiará la unión de los elementos de las tres primeras fases (tubos básicos, mejoras e incorporaciones de los tubos básicos y secciones multitubo) de manera que la estructura final sea la más eficiente, mejorando las características que tenían los modelos básicos en todas sus facetas, Ilustración 41.

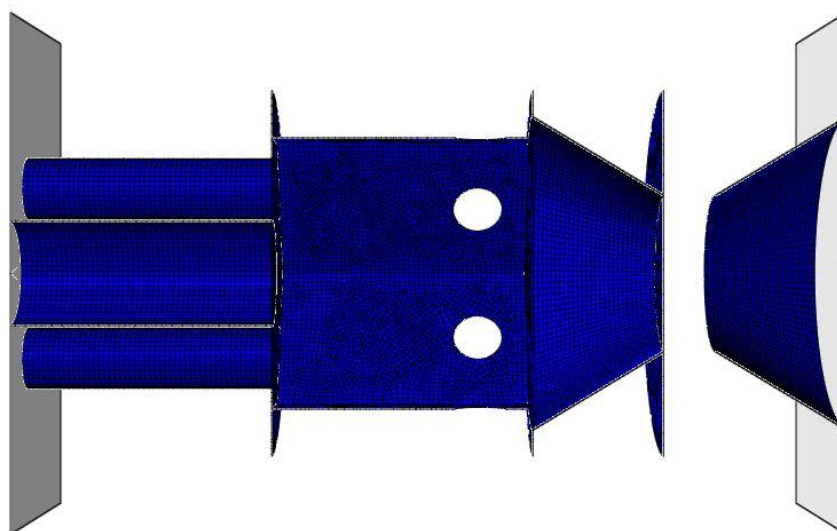


Ilustración 41. Ejemplo de modelo de la fase final.

4.2. Tamaño de los elementos finitos. Sensibilidad de la malla

Primeramente, y antes de realizar cualquier estudio, se tiene que realizar un estudio de sensibilidad de la malla, es decir, analizar el tamaño que deberían tener los elementos de cada modelo para alcanzar unos resultados correctos. Un mayor número de elementos acercará la solución a la deseada pero con un tiempo computacional muy alto. Esto no es deseable ya que, con una cantidad menor de elementos se pueden llegar a obtener resultados perfectamente validos en un tiempo bastante menor.

A modo de ejemplo, se muestra el análisis de sensibilidad malla de un modelo básico con diferentes tamaños de elemento. Las variables de interés que van a ser estudiadas en este análisis son la longitud deformada de la estructura, así como las reacciones de la placa empotrada al tubo. Se van a realizar una serie de simulaciones que tienen como objetivo alcanzar una deformación común en los tubos considerando diferentes mallados y unas curvas de Fuerza-Tiempo parecidas entre sí.

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos para 7 tamaños de malla diferentes de un tubo de sección circular de longitud igual a 2 m, radio interior de 0.3 m y un espesor de 1.5 mm. Esta tabla muestra el número total de elementos, su tamaño, el tiempo computacional que se ha necesitado para alcanzar la solución y la longitud total deformada del modelo.

Tabla 6. Diferentes mallados

Tamaño de los elementos [m]	Número de elementos	Tiempo [s]	ΔL [m]
0.050	1520	66	0.594
0.040	2350	139	0.718
0.030	4221	722	1.268
0.025	6000	1255	1.286
0.020	9400	2344	1.651
0.015	16884	5524	1.592
0.010	37412	20774	1.551

Como cabía esperar, los modelos con un tamaño de elemento mayor y por tanto con menos elementos, presentan unos tiempos computacionales bastante menores a los modelos que utilizan más elementos. Con estos últimos modelos se alcanza una convergencia de resultados. La ilustración 42 muestra los resultados ya comentados con las diferencias apreciables en las deformaciones máximas.

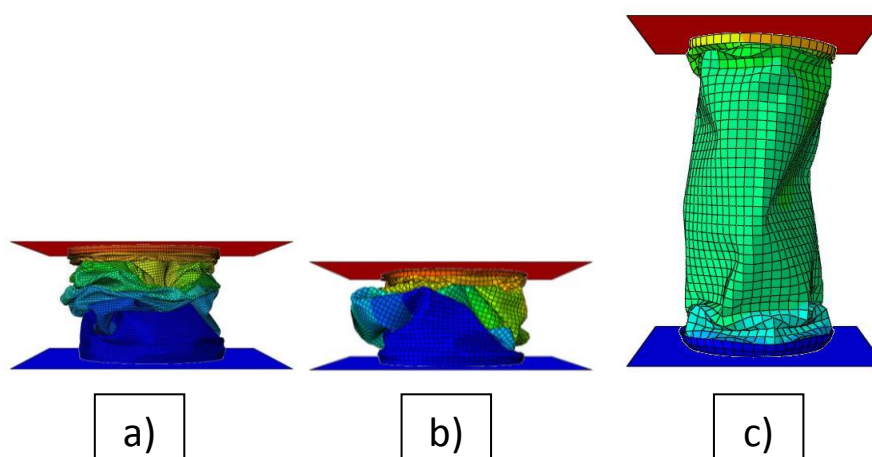


Ilustración 42. Modelos cilíndricos con diferentes tamaños de malla. a) 0.01, b) 0.02 y c) 0.04 m de lado.

Los resultados de las simulaciones para los tamaños 0.015 y 0.010 son muy parecidos a los obtenidos para el tamaño 0.02, por lo que, a continuación se acota aún más el estudio con unos tamaños en torno a este último para encontrar el tamaño final a utilizar.

Tabla 7. Tamaño de malla refinado

Tamaño de los elementos [m]	Número de elementos	Tiempo [s]	ΔL [m]
0.025	6000	1255	1.286
0.022	7826	1632	1.583
0.020	9400	2344	1.651
0.017	13098	3436	1.635
0.015	16884	5524	1.592

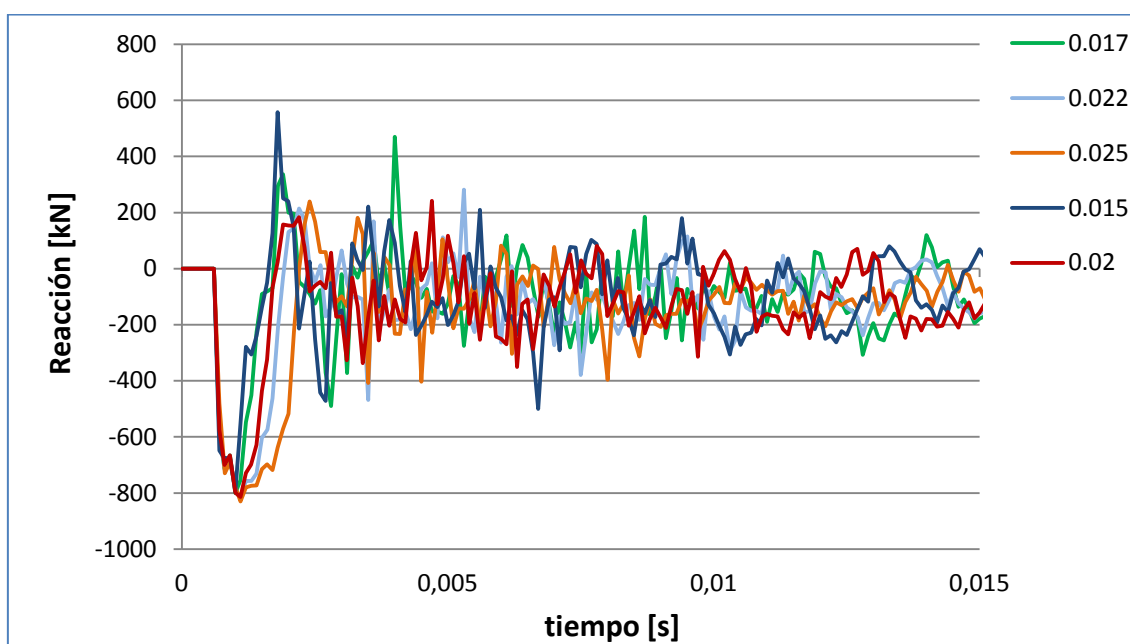


Ilustración 43. Diferentes tamaños de malla 1. Reacción vs. Tiempo

En la Ilustración 43, se muestran las reacciones obtenidas en las simulaciones con los diferentes tamaños de malla de la Tabla 7. De la convergencia observada se prescinde de los tamaños de malla 0.025 y 0.015.

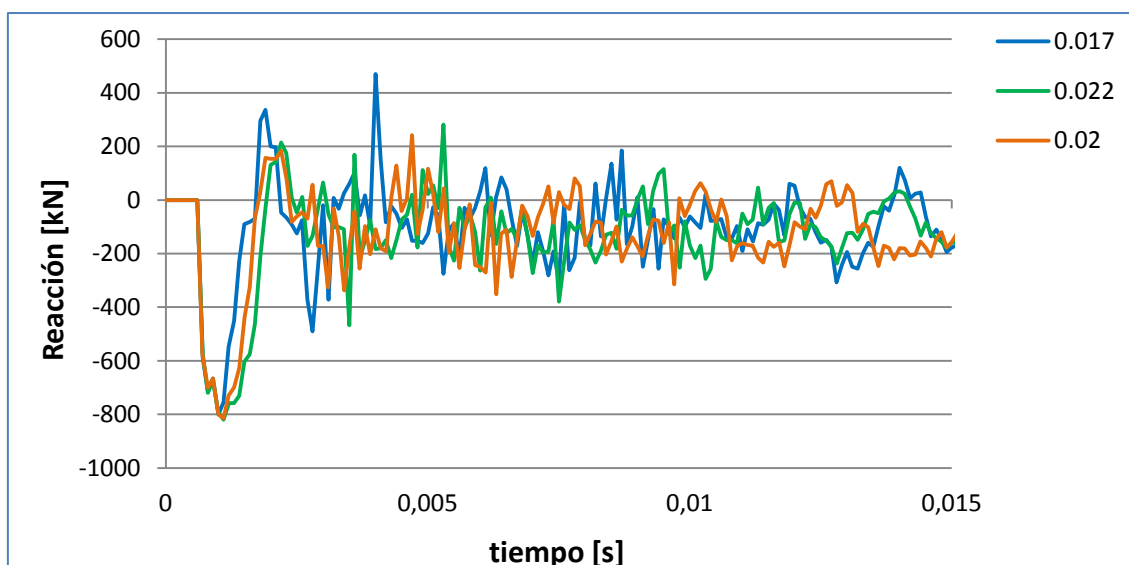


Ilustración 44. Diferentes tamaños de malla 2. Reacción vs. Tiempo

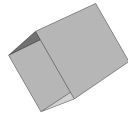
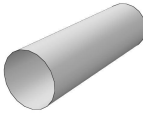
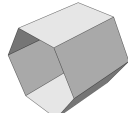
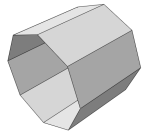
Una vez realizado este último estudio sobre la sensibilidad de la malla se concluye que el uso de un tamaño de elemento muy pequeño no aporta más eficiencia que otros tamaños mayores y gracias a la Tabla 7 y a la Ilustración 44 y admitiendo que los resultados obtenidos sean ligeramente diferentes a la solución real, el tamaño de malla más eficiente de los 7 analizados sería el de 0.022.

4.3. Fase 1. Modelos de sección básica.

En esta primera fase se estudian varios tubos de diferente sección empotrados con tres espesores diferentes. La utilización de diferentes secciones y espesores dará lugar a soluciones diferentes de la colisión y valores diferentes de energía específica y capacidad de absorción de energía. Con estos primeros modelos se buscan las secciones más eficientes que se usaran para los diseños posteriores. Se supone que esta solución es ideal aunque próxima a la realidad, ya que la colisión de un vehículo ferroviario sucede, en su mayoría, en un solo eje de desplazamiento.

La tabla 8 muestra los modelos que van a ser estudiados con sus respectivos espesores y masas:

Tabla 8. Características principales de los modelos de sección básica

Sección	Abreviatura	Espesores [mm]	Masa [kg]	
Cuadrada	Cu	1	9.164	
		1.5	13.746	
		2	18.328	
Circular	Ci	1	10.17	
		1.5	15.27	
		2	20.35	
Hexagonal	He	1	9.720	
		1.5	14.580	
		2	19.440	
Octogonal	O	1	9.919	
		1.5	14.878	
		2	19.838	

4.3.1. Tubo con sección cuadrada

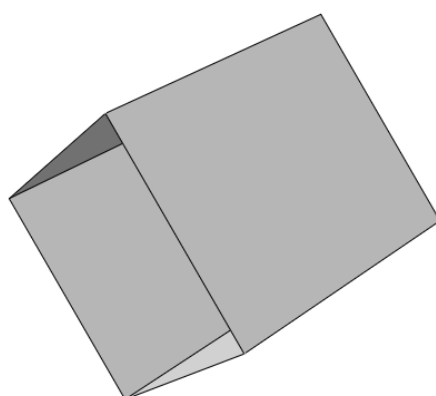


Ilustración 45. Modelo de sección cuadrada

En primer lugar se va a realizar la simulación de la sección cuadrada, Ilustración 45, en la que se va a estudiar como varía la deformación y las reacciones que se producen

en función del espesor. Los espesores a utilizar serán de 1, 1.5 y 2 mm, siendo la estructura de 1 mm de espesor la menos rígida, aumentando su rigidez a medida que lo hace su espesor. La Ilustración 46 muestra como el espesor de la estructura y por tanto, su rigidez, afecta a la longitud deformada en el mismo instante de tiempo.

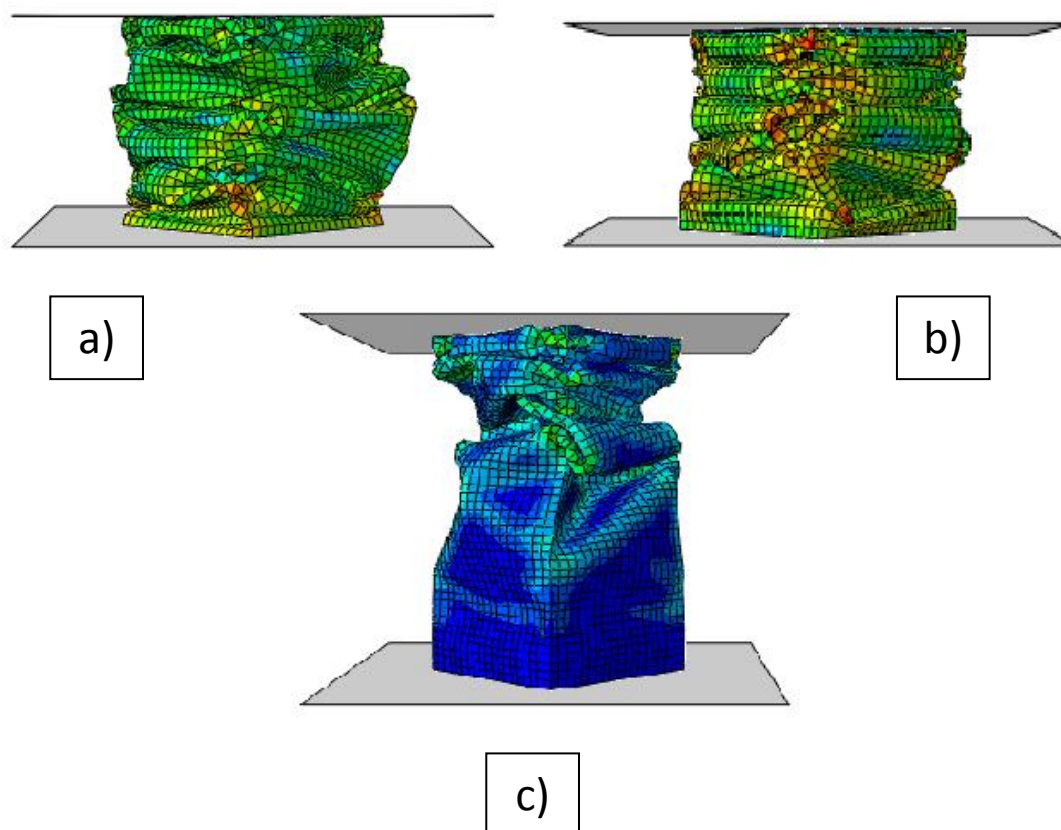


Ilustración 46. Deformación del modelo de sección cuadrada con tres espesores diferentes, a) 1, b) 1.5 y c) 2 mm.

En la Ilustración 47 se muestran los resultados obtenidos de las fuerzas de reacción que se generan en la placa empotrada con los 3 espesores utilizados. A primera vista, se puede concluir que el modelo de menor espesor provoca unas reacciones menores durante todo el proceso de deformación, pero no es lo suficientemente resistente y acaba colapsando en torno a los 0.15 s, disminuyendo la reacción y por tanto siendo un modelo ineficiente.

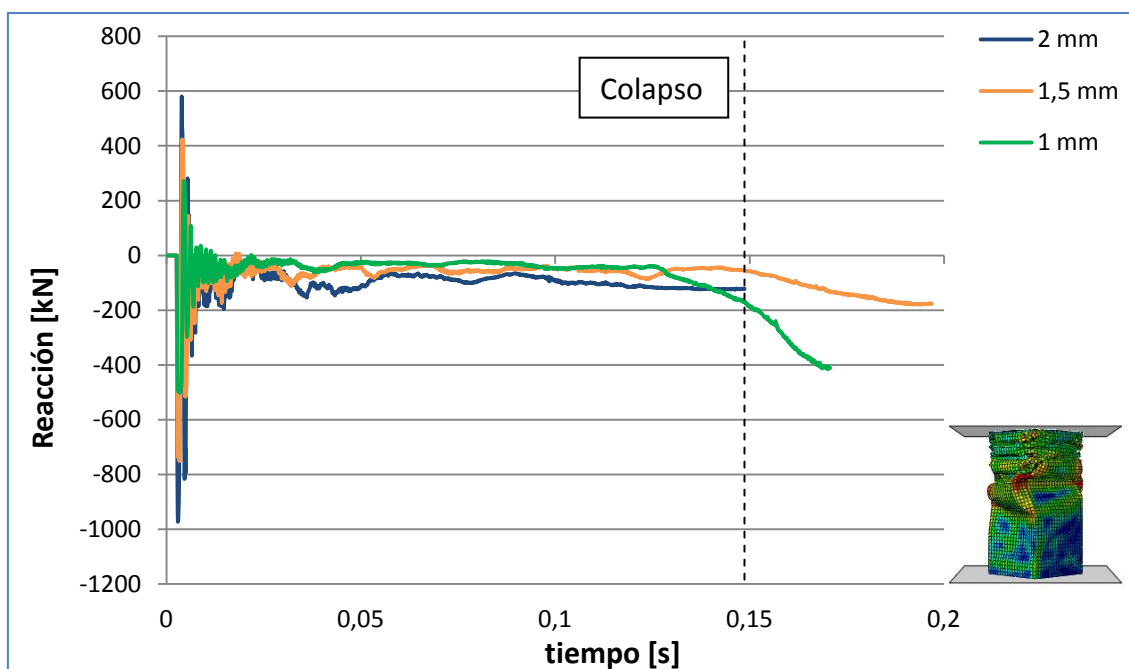


Ilustración 47. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección cuadrada

Para un análisis más detallado del modelo se ha realizado una acotación de los resultados entre el instante del impacto, aproximadamente 0.002 s, y 0.015 s. El primer valor siempre será diferente a cero ya que para una correcta simulación se tiene que separar la placa móvil de la estructura tubular, y por tanto las reacciones que se producen en el momento de impacto son en un instante diferente de 0. El último valor de tiempo se toma asumiendo que a partir de ese momento, las reacciones que se sufren ya son casi constantes. En cualquier caso, si en las simulaciones se obtienen aceleraciones relevantes, estas serán mostradas y explicadas.

De las tres secciones ya se ha descartado el uso del modelo con un espesor de 1 mm, por lo que faltaría el estudio de los otros dos espesores. En la Ilustración 48 se muestran las reacciones que se producen con cada uno de los espesores y, como era de esperar, debido a la diferencia de espesor se generan mayores aceleraciones en el diseño de mayor espesor, al igual que ocurría con el de 1 mm de espesor. Estas reacciones podrían inducir a incomodidades en los ocupantes e incluso lesiones.

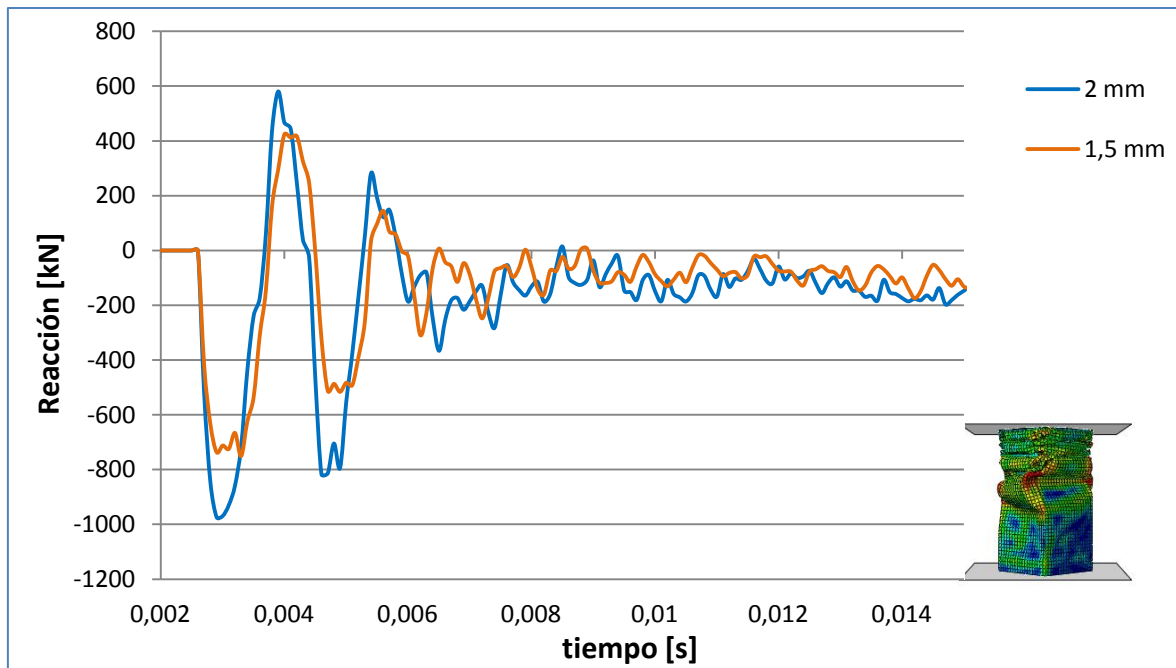


Ilustración 48. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección cuadrada

4.3.2. Tubo con sección hexagonal

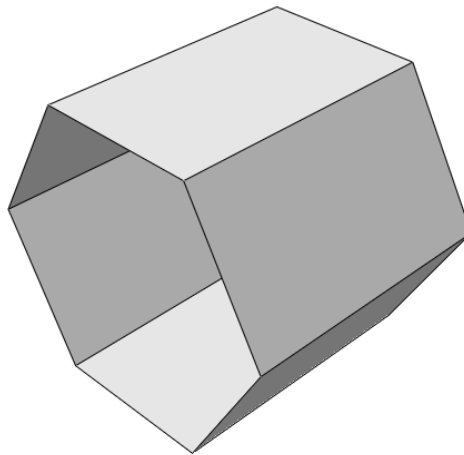


Ilustración 49. Modelo de sección hexagonal

El tubo hexagonal, Ilustración 49, a estudiar tendrá las mismas condiciones del modelo con sección cuadrada del punto anterior.

En las Ilustraciones 50 y 51 se puede observar como los modelos, al igual que los realizados con la sección cuadrada, presentan un espesor que colapsa y otros dos que tienen un comportamiento parecido.

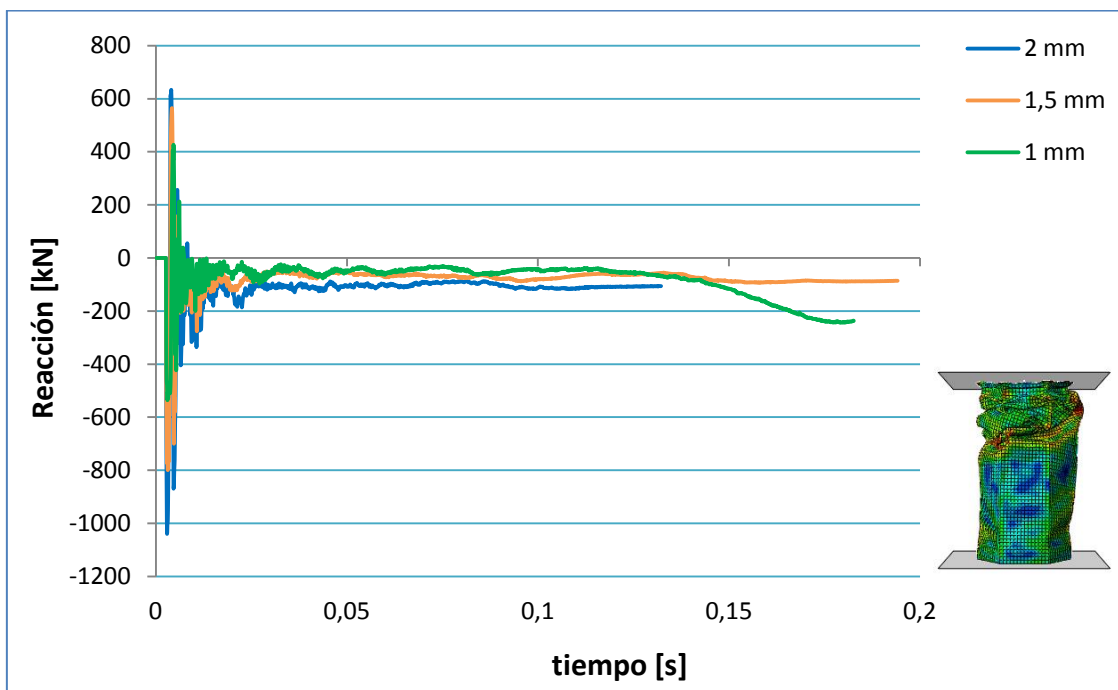


Ilustración 50. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección hexagonal

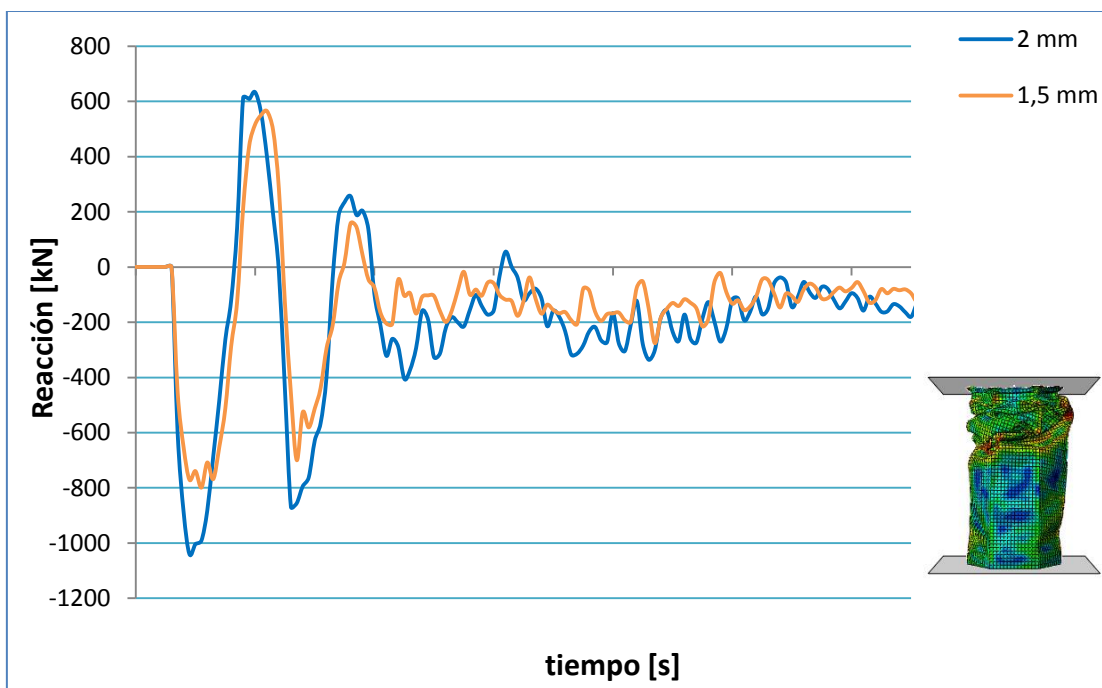


Ilustración 51. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección hexagonal

4.3.3. Tubo con sección circular

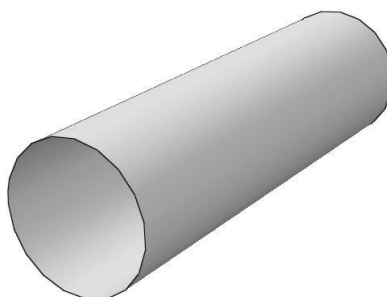


Ilustración 52. Modelo de sección circular

La siguiente estructura de forma cilíndrica, Ilustración 52. Se prevé que este modelo sea el uno de los más eficientes dentro del apartado de las secciones básicas. Aun así se contrastarán los resultados en el último apartado. A continuación, en las Ilustraciones 53 y 54, se muestran las reacciones que surgen en la colisión para los tres espesores analizados, 1, 1.5 y 2 mm.

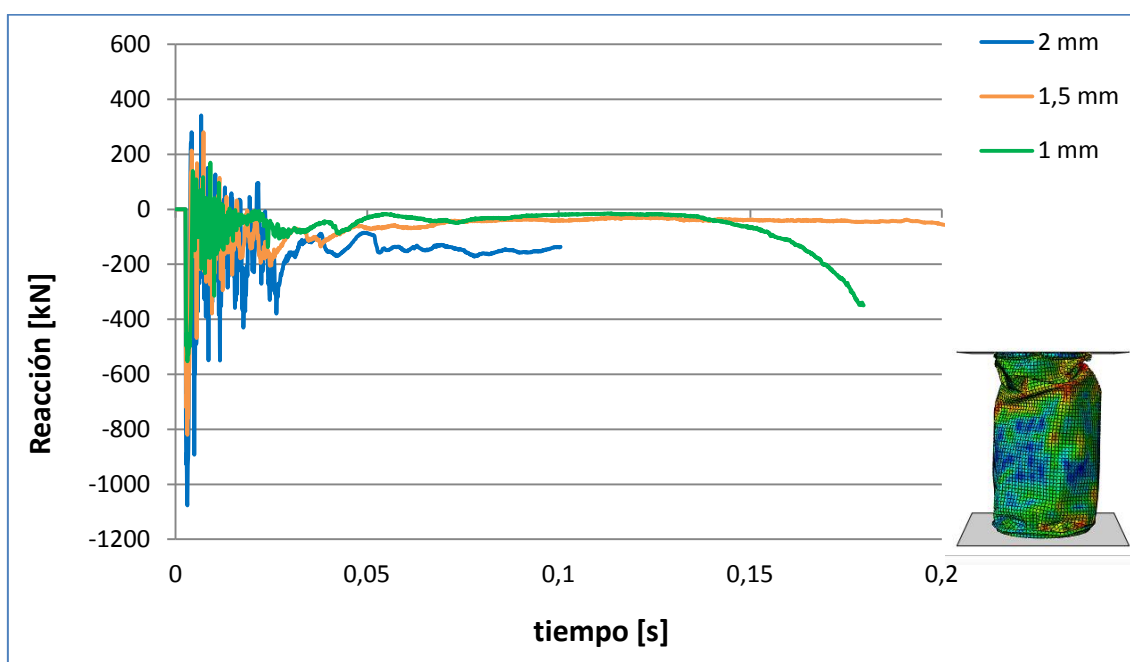


Ilustración 53. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección circular

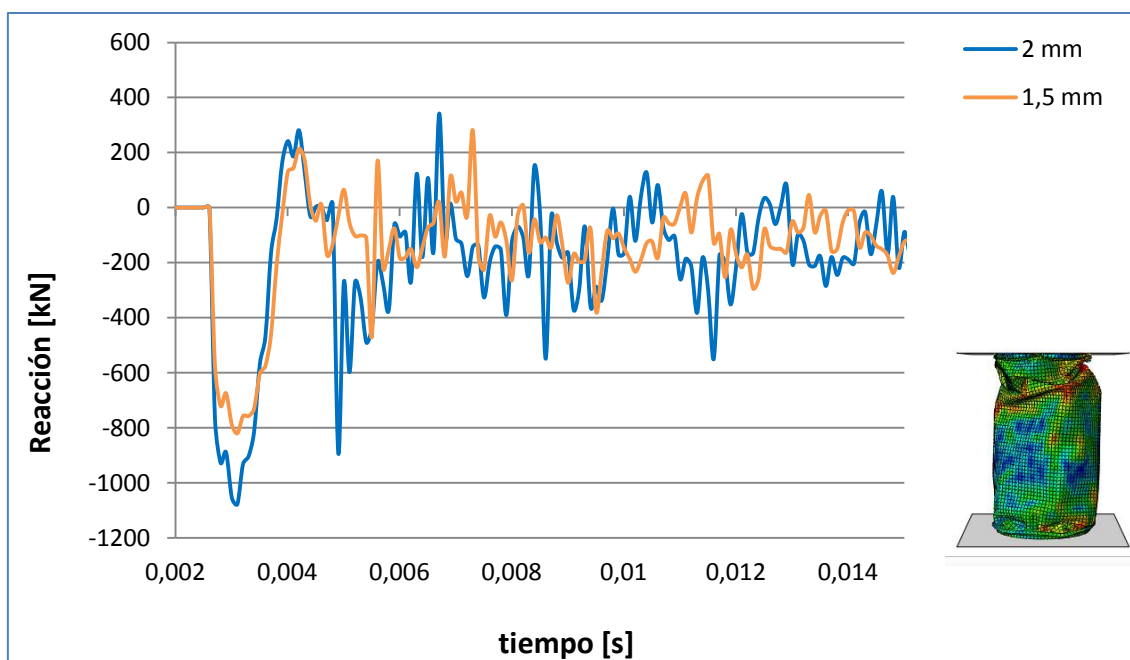


Ilustración 54. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección circular

4.3.4. Tubo con sección octogonal

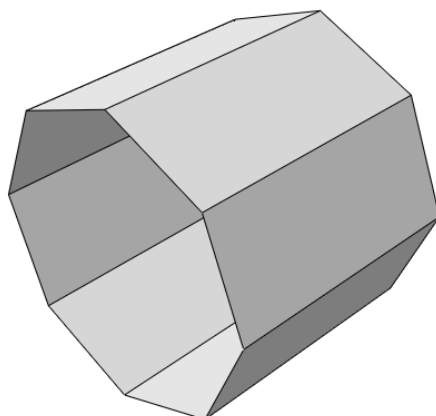


Ilustración 55. Modelo de sección octogonal

Por último dentro del apartado de las secciones básicas se va a simular el impacto sobre una estructura tubular de sección octogonal, Ilustración 55. Dentro de las secciones simples la octogonal es la que tiene más similitud con la circular por lo que se espera que tenga propiedades parecidas aunque siendo menos eficiente. La Ilustración 56 muestra los resultados de las simulaciones de los 3 espesores utilizados.

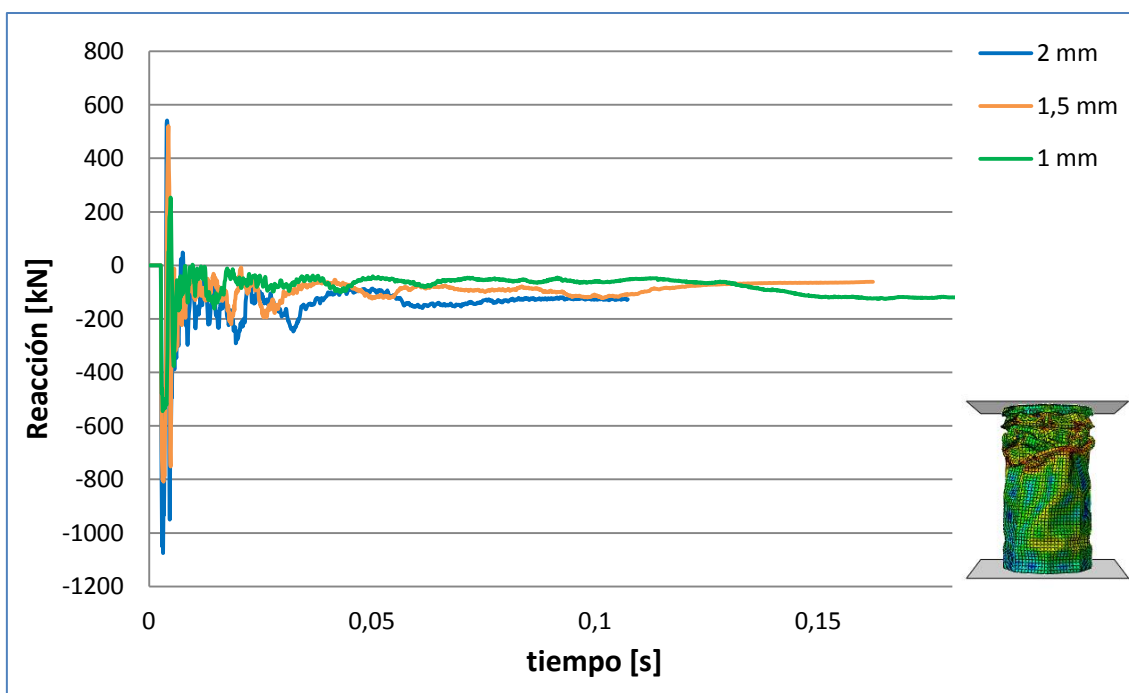


Ilustración 56. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección octogonal

En este caso, no colapsa ninguna de las tres estructuras por lo que, ilustración 57, se muestra un detalle del impacto para este análisis de tres espesores diferentes.

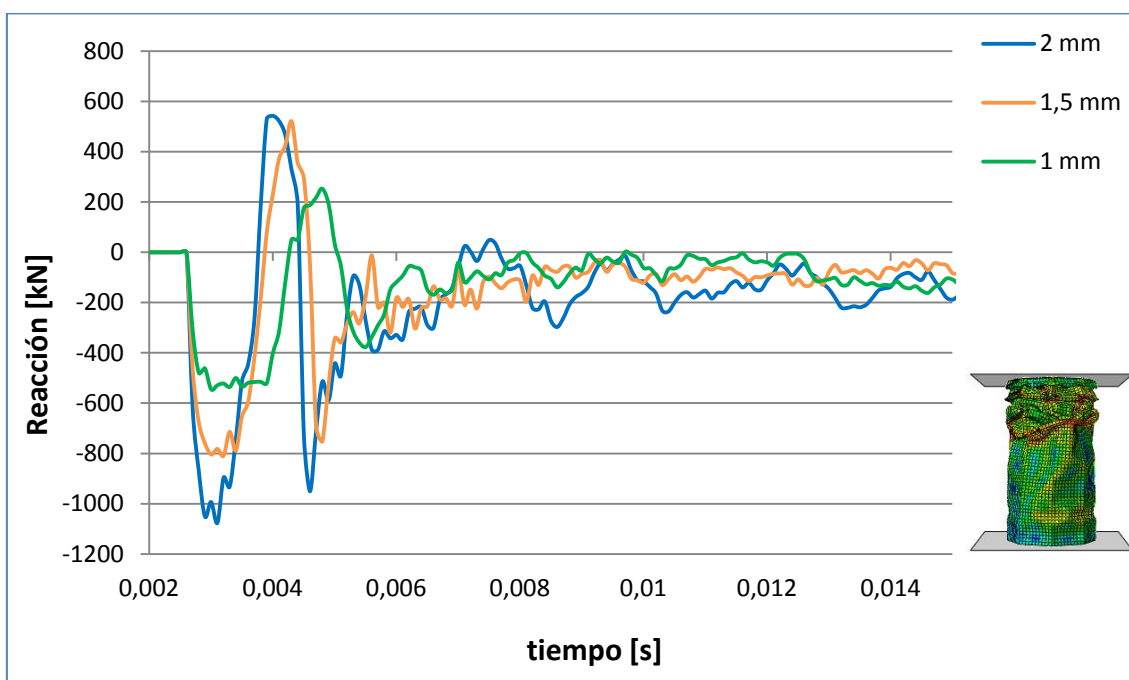


Ilustración 57. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección octogonal

4.3.5. Variables de interés. Fase 1.

En este apartado se van a sacar diferentes conclusiones sobre los resultados de los análisis realizados en la Fase 1 de la colisión sobre tubos con una sección básica (circular, cuadrada, hexagonal y octogonal). Además, se van a analizar posibles mejoras que se podrían introducir a los diferentes modelos.

Aceleraciones, reacciones y estructuras deformadas.

En primer lugar, se estudia el comportamiento de los modelos y su capacidad para disipar la energía de manera controlada, observando cómo evolucionan las reacciones en la placa que está empotrada, y las aceleraciones que tienen lugar en la móvil que representa el tren. Las Ilustraciones 58 y 59 muestran las reacciones y aceleraciones de las simulaciones realizadas con los modelos de 1.5 mm de espesor.

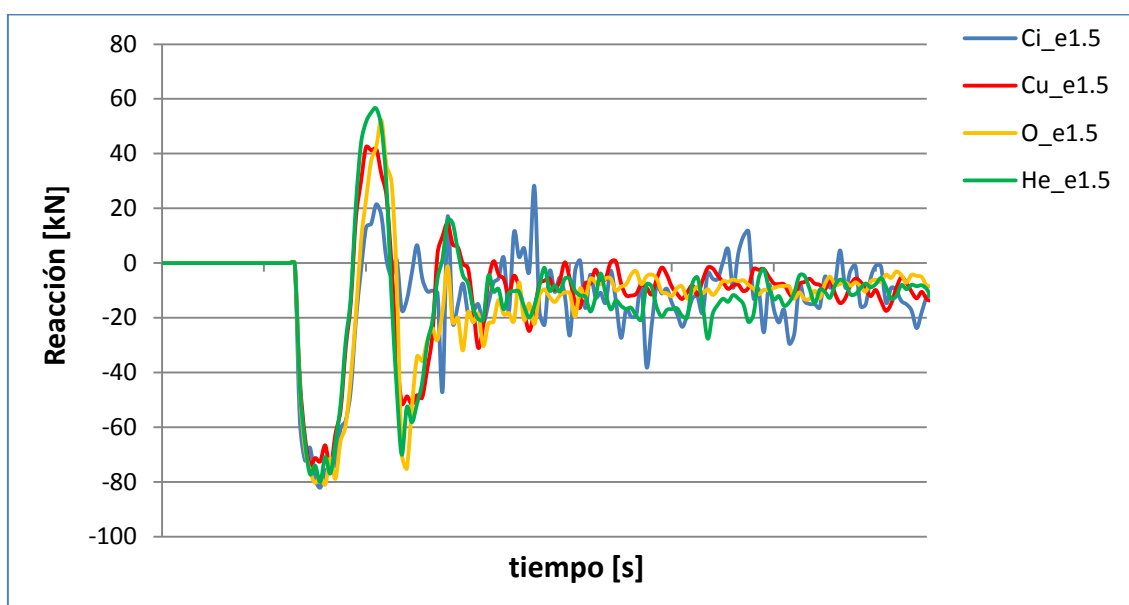


Ilustración 58. Comparación entre secciones básicas. Reacción vs. Tiempo

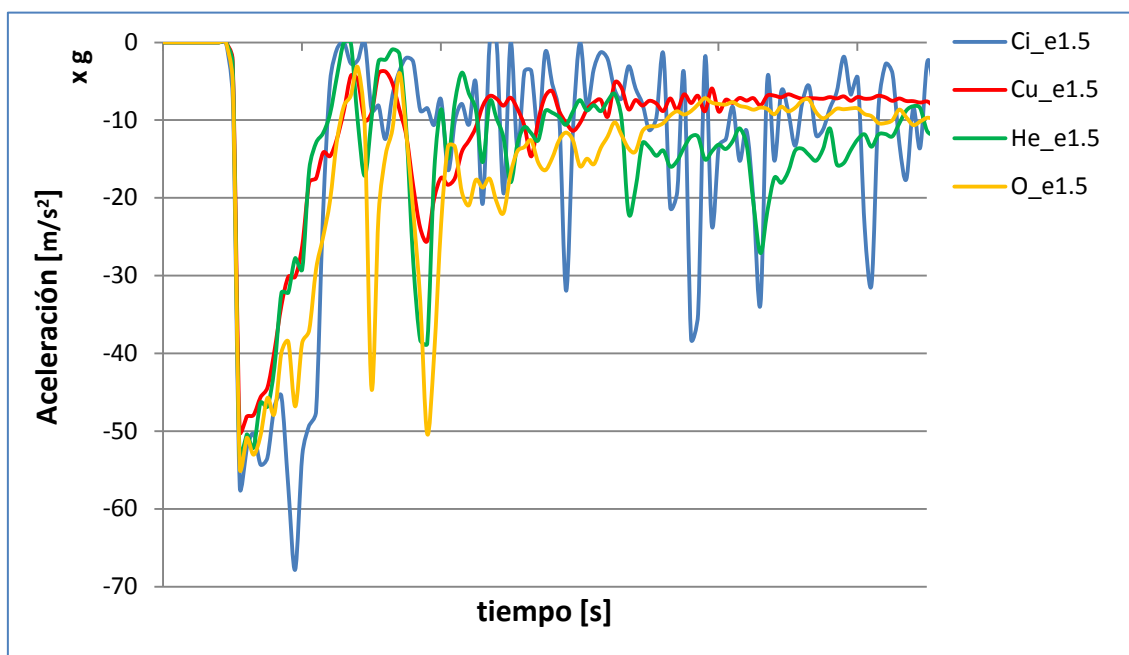


Ilustración 59. Comparación entre secciones básicas. Aceleración vs. Tiempo

La Tabla 9 muestra los resultados de las aceleraciones mínima y media para las secciones simuladas:

Tabla 9. Aceleraciones sección básica

Tipo de sección	a_min [$g \cdot m/s^2$]	a_med [$g \cdot m/s^2$]
Cuadrada	-50.64	-9.86
Circular	-67.12	-10.44
Hexagonal	-53.14	-14.25
Octogonal	-54.33	-11.56

Lo más representativo son los resultados del modelo de sección circular, los valores obtenidos de aceleración mínima son considerablemente mayores a los del resto de modelos. La sección octogonal tiene unas cualidades mejores a la circular y parecidas a las de la sección hexagonal. La sección cuadrada da una respuesta muy buena a este tipo de ensayo con unos resultados de aceleraciones mínima y media inferiores a los del resto de modelos.

Los desplazamientos máximos de la placa móvil obtenidos por las simulaciones son los mostrados en la Ilustración 60:

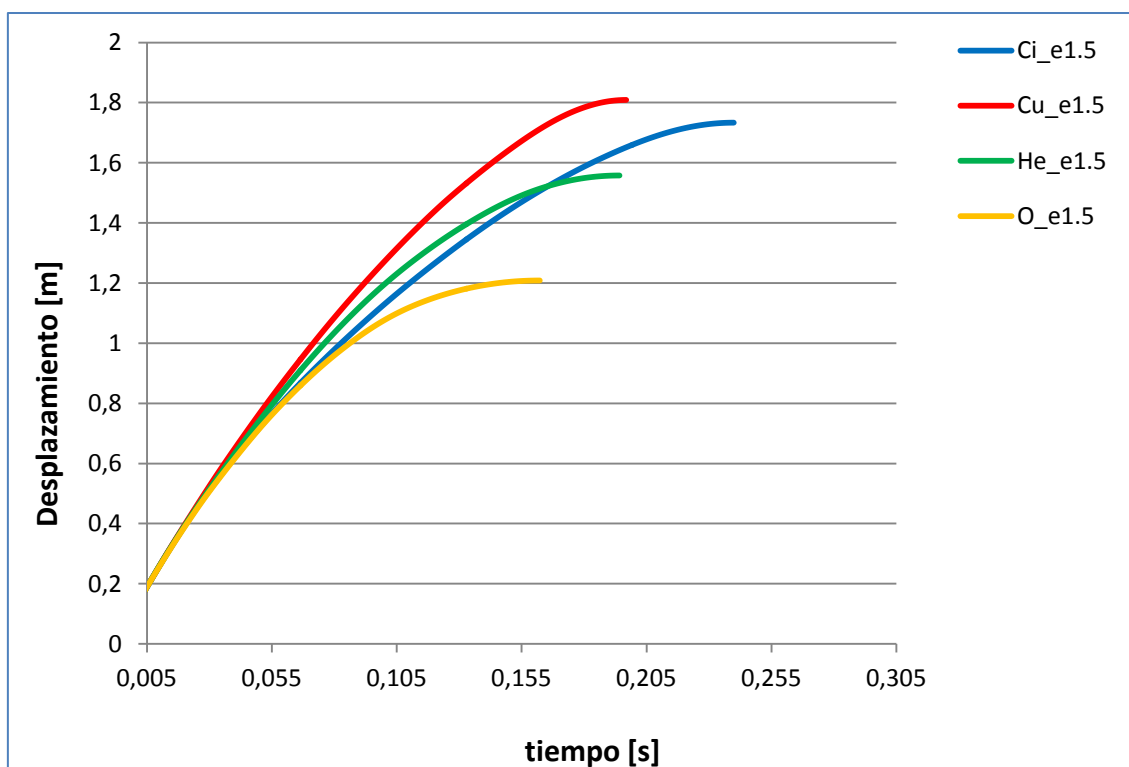


Ilustración 60. Deformaciones sección básica. Deformación vs. Tiempo

Las secciones octogonal y hexagonal presentan un desplazamiento máximo menor a los modelos de sección circular y cuadrada. Corroborando así las conclusiones obtenidas en las reacciones. Unas mayores reacciones en la placa empotrada implican unas desaceleraciones más grandes en la placa móvil y por tanto el uso de menos material para frenar la masa en movimiento de la simulación. Por otro lado, el modelo tubular cuadrado y el hexagonal presentan unos tiempos hasta la longitud deformada máxima casi idénticos, por lo que a la hora de disipar energía estas secciones serían más efectivas.

Energía cinética absorbida

En todos los modelos simulados de espesor 1.5 mm y 2 mm se conseguía disipar toda la energía cinética, sin embargo, esto no sucedía en todos los modelos de 1 mm de espesor. Para la comparación de los modos de absorción de energía se han utilizado dos variables y han sido utilizados los resultados de las simulaciones de los modelos de 1.5 mm de espesor:

- Energía específica

La energía específica es la energía absorbida en relación con la masa deformada del modelo. Esta variable es muy importante ya que su optimización permite el ahorro del material en función de la sección o el espesor del modelo. Con un mayor espesor se consiguen menores valores de energía específica aunque se comprometen las aceleraciones como se estudió anteriormente. En la Tabla 10, se muestra la energía específica para cada una de las estructuras de 1.5 mm de espesor.

Tabla 10. Energía específica de los modelos de sección básica

Tipo de sección	Energía específica [J/kg]
Cuadrada	9865.82
Circular	9306.36
Hexagonal	10968.08
Octogonal	14290.03

- Capacidad de absorción de energía de la estructura

Esta variable es de gran interés para el análisis de los resultados del problema ya que indica la energía que absorbe la estructura por unidad de longitud siendo muy diferente para cada sección de igual espesor. Interesa que esta variable tenga un valor pequeño ya que si este valor es grande, implica que la aceleración también lo es y esto compromete la confortabilidad de los pasajeros. La Tabla 11 muestra los valores de la capacidad de absorción de cada modelo:

Tabla 11. Capacidad de absorción de energía de los modelos de sección básica

Tipo de sección	Capacidad de absorción de energía [J/mm]
Cuadrada	67.807
Circular	71.054
Hexagonal	79.957
Octogonal	106.304

4.3.6. Conclusiones. Fase1.

Como conclusión, en esta primera fase se puede decir que las secciones cuadrada y hexagonal son las que mejores características aportan. Esto se debe a que estos dos modelos tienen aristas que provocan la deformación y por lo tanto que esta sea más uniforme y controlada.

Por otro lado, los espesores utilizados se tendrán muy en cuenta pero no se puede concluir que un espesor sea mejor o peor, ya que dependiendo del diseño final se podrán utilizar espesores de menor o mayor tamaño a los considerados en esta fase.

Finalmente, los principales problemas que se aprecian tras el estudio de esta primera fase son la homogeneidad de las deformaciones de la estructura y el gran pico de aceleración inicial que se produce. Estos problemas se van a intentar solucionar en la siguiente fase para poder utilizar estos modelos en el diseño final de la topera.

4.4. Fase 2. Optimización de los modelos de secciones básicas.

En esta fase se van a realizar diferentes pruebas para solucionar los problemas encontrados en la primera fase. Este apartado va a estar dividido en dos partes que muestran los dos elementos que se han añadido para optimizar los modelos.

La primera parte, consistirá en el estudio de estructuras con aceleradores, también llamados *triggers* que son una serie de agujeros en los modelos que provocarán que las deformaciones tras el impacto sean controladas, las gráficas de reacciones y aceleraciones serán más regulares, es decir no hay ni aumentos ni disminuciones drásticas de los resultados, aportando una mejor capacidad para absorber energía incluso con la pérdida de material que supone la existencia de agujeros.

La segunda parte consistirá del estudio de estructuras adicionales que absorban energía de manera que se solucione el efecto impacto o el pico de desaceleración inicial tras la colisión. Estas estructuras se unirán con las ya estudiadas en la fase 1 para optimizar los modelos.

Como ya se estudió en la fase anterior los modelos cilíndricos tienen unas capacidades peores respecto a los de sección cuadrada o hexagonal, es por ello que estos modelos de sección circular serán los utilizados en esta fase para que las mejoras

sean más fáciles de apreciar y luego aplicarlas a los modelos de sección cuadrada y hexagonal. Tras las simulaciones se compararán los resultados obtenidos de los modelos con y sin los nuevos elementos para decidir si su uso mejora estas estructuras de disipación de energía.

4.4.1. Tubos con aceleradores

En esta parte de la segunda fase se estudian los tubos cilíndricos a los que se añaden agujeros que actúan como aceleradores de la deformación, provocando que esta sea más uniforme y mejore las características de absorción de energía de la estructura.

El número y la colocación de los agujeros tendrán mucha influencia en el modo de deformación del modelo, así como en el pico de aceleración que aparece en el momento del impacto. Las configuraciones de 8, 16 y 24 agujeros elegidos se muestran en la Ilustración 61.

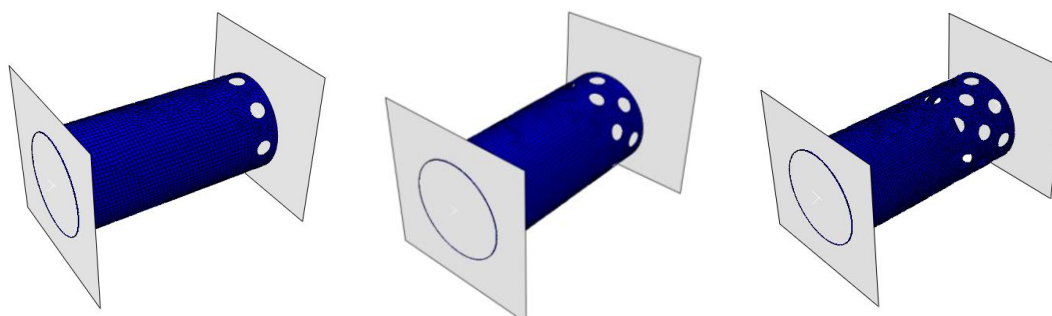


Ilustración 61. Configuración de los agujeros del modelo circular

Las reacciones resultantes de la utilización o no de los agujeros varían mucho, Ilustración 62, al igual que ocurre con las aceleraciones, Ilustración 63. Se aprecia una onda más uniforme cuando existen por lo que debería aportar mayor capacidad para absorber la energía cinética.

Tabla 12. Abreviaturas. Sección circular

Sección	Abreviatura
Circular	Ci
Circular con 8 agujeros	Ci8A
Circular con 16 agujeros	Ci16A
Circular con 24 agujeros	Ci24A

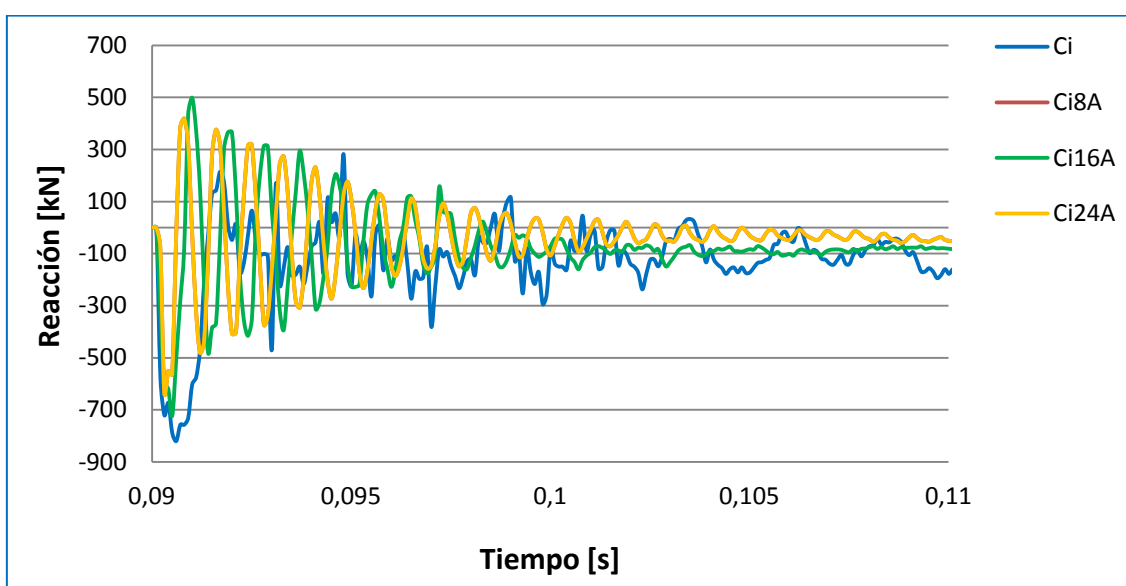


Ilustración 62. Modelos de sección circular con diferente número de agujeros. Reacción vs. Tiempo

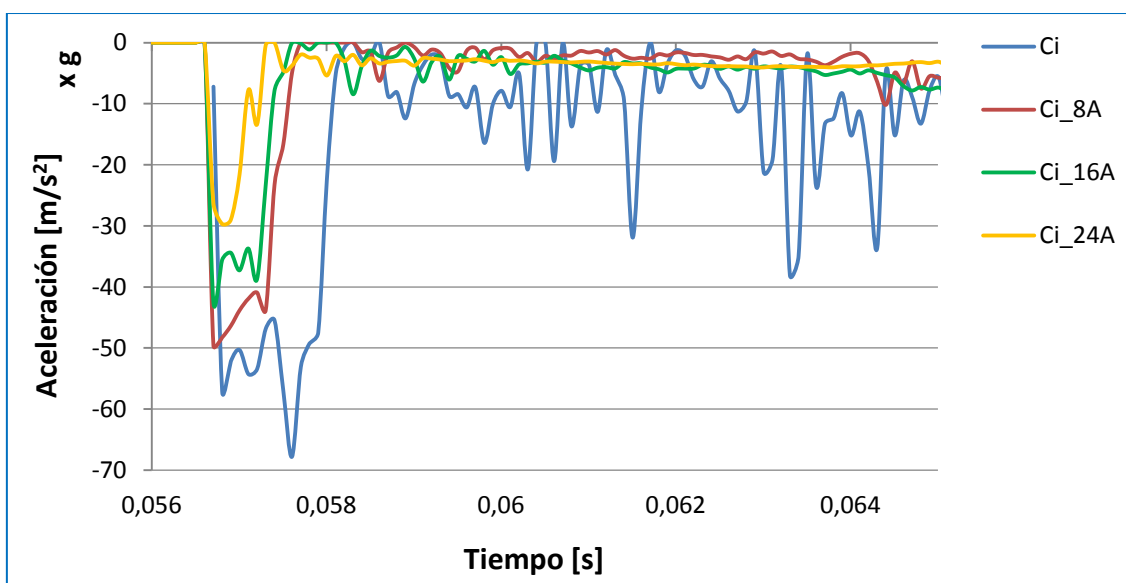


Ilustración 63. Modelos de sección circular con diferente número de agujeros. Aceleración vs. Tiempo

Cabe destacar que el uso de más o menos agujeros, que hace disminuir en mayor o menor medida el pico de aceleración inicial, podría provocar el colapso de la estructura, siendo los modelos con mayor número de agujeros los que tienen una mayor probabilidad de que esto suceda. Para la optimización de la estructura se tendrán que comprobar cuántos de agujeros son los óptimos.

4.4.2. Tubos con elementos contra el impacto

En el momento de la colisión entre estructuras se generan grandes picos de aceleración. Como se ha indicado con anterioridad, en esta parte del proyecto se van a estudiar incorporaciones al modelo final que reduzcan este tipo de picos en las aceleraciones.

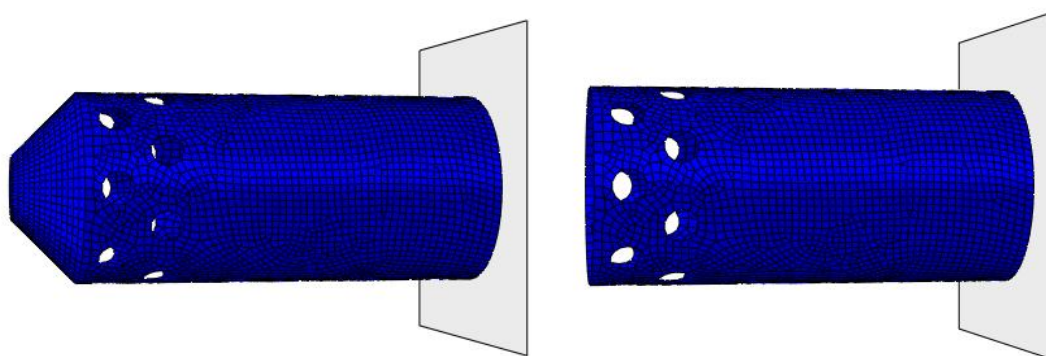


Ilustración 64. Modelos de sección circular con y sin tronco cónico

Una forma de disminuir el pico de aceleración inicial es el uso de troncos de cono situados en el extremo de los tubos, Ilustración 64. Se espera que estas estructuras ayuden a reducir las aceleraciones que se aparecen justo al colisionar el vehículo ferroviario con la topera. Las Ilustraciones 65 y 66 muestran las reacciones y aceleraciones que se producen en los modelos de sección circular cuando se les añade un tronco de cono en el extremo del impacto. El principal problema que se encuentra con esta modificación son las dobles aceleraciones que aparecen tras la deformación del cono y el siguiente proceso de deformación de la estructura adyacente. Otro parámetro que influye en los resultados es el ángulo de inclinación del tronco cónico, en este caso, el ángulo utilizado es de 45 grados.

Tabla 13. Abreviaturas. Tronco cónico

Sección	Abreviatura
Circular	Ci
Circular con cono	CiCC
Circular con cono y placa	CiCCP

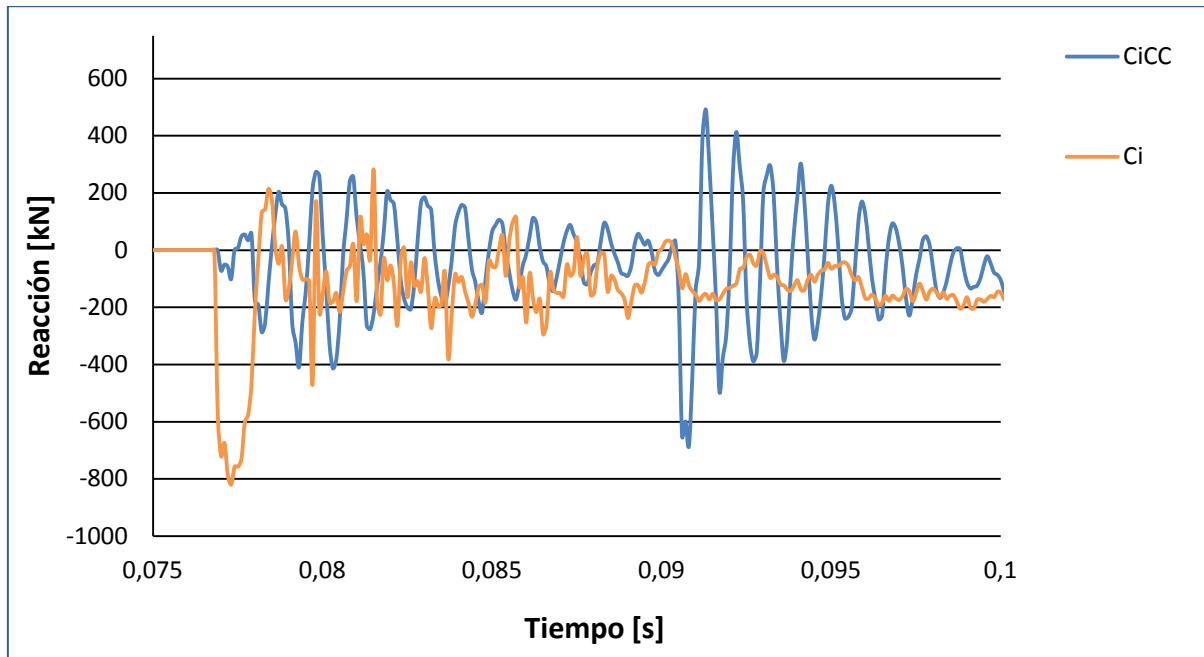


Ilustración 65. Modelos de sección circular con y sin tronco de cono. Reacción vs. Tiempo

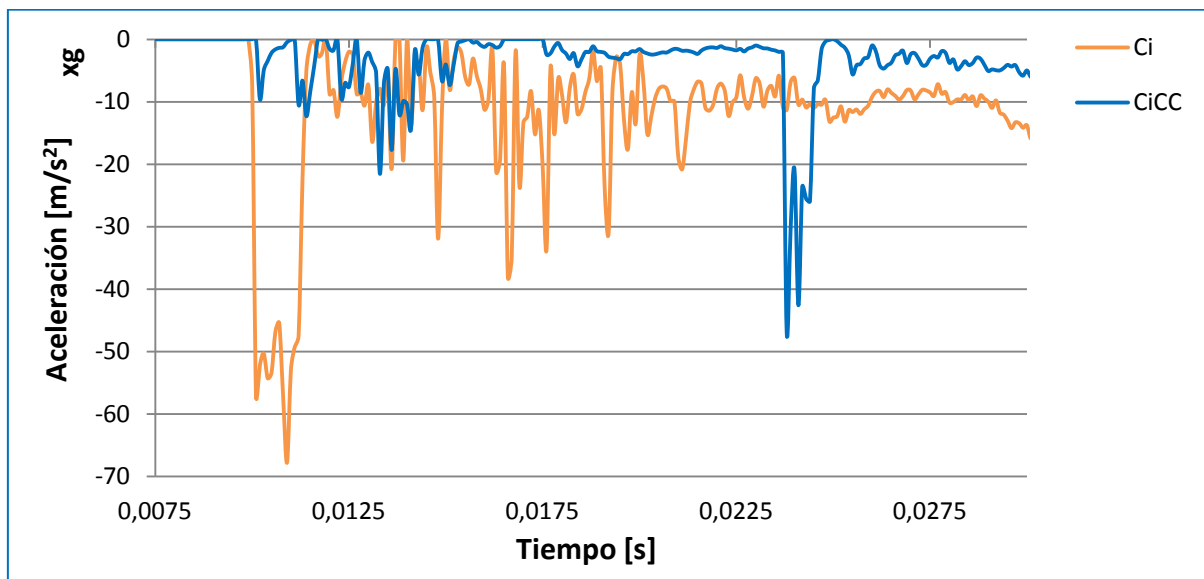


Ilustración 66. Modelos con la estructura de tronco de cono y sin él. Aceleración vs. Tiempo

Como se puede apreciar, se forman dos picos de aceleración. El primero es el del impacto, como se esperaba este pico de aceleración tiene un valor menor cuando se añade el tronco de cono, sin embargo, y como ya se ha comentado, aparece otro pico de aceleración que representa la colisión de la placa del tren con la siguiente estructura de sección circular. Si comparamos las simulaciones, los modelos que tienen un tronco cónico consiguen retrasar el pico máximo de aceleración y lo reducen.

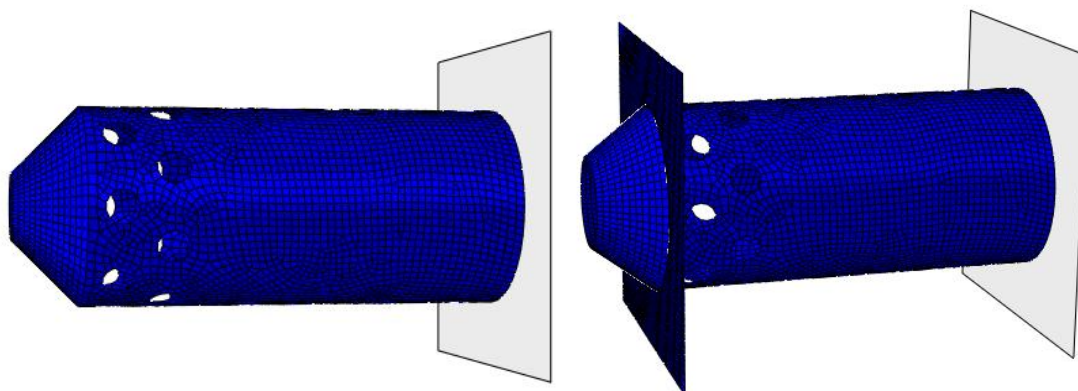


Ilustración 67. Modelos de sección circular con y sin placa de amortiguamiento

Para solucionar este problema, se añade al modelo en la unión cono-cilindro una placa, Ilustración 67, con un espesor de 1mm y fabricada con el mismo aluminio, que ayuda y actúa de amortiguador para producir unas aceleraciones uniformes y controladas a lo largo del impacto. Las Ilustraciones 68 y 69 muestran esta mejora. Los picos de aceleración en el momento del impacto son más grandes a los del modelo sin la placa pero a cambio se ha eliminado el segundo pico y reducido el primero en casi un 50%.

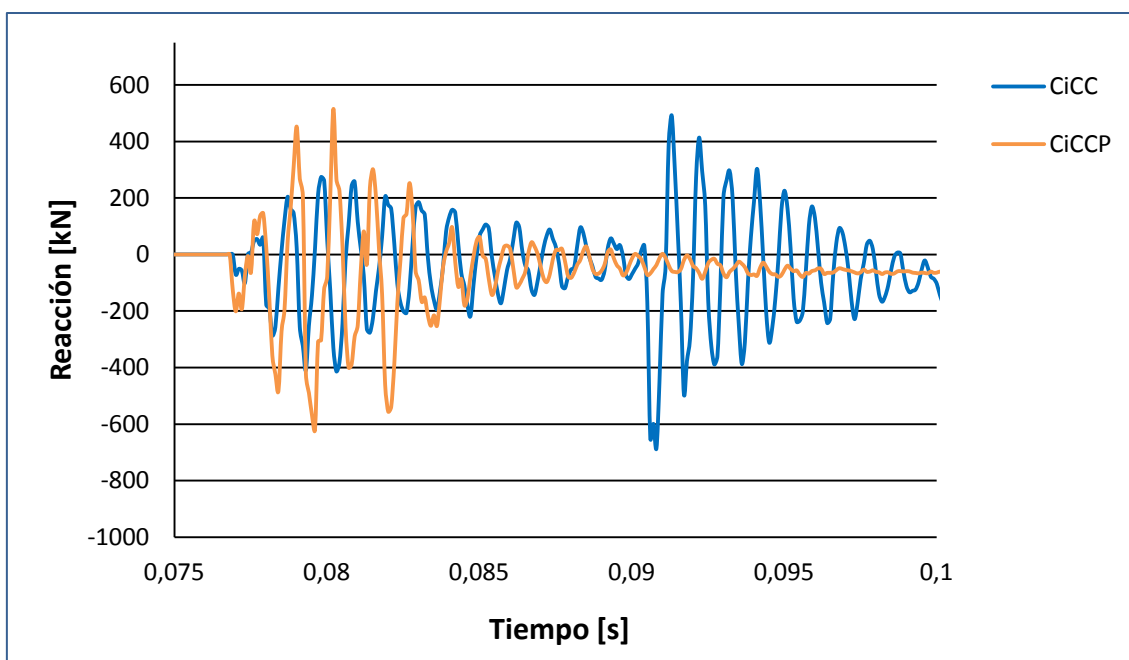


Ilustración 68. Modelos con la estructura de tronco de cono con placa y sin placa. Reacción vs. Tiempo

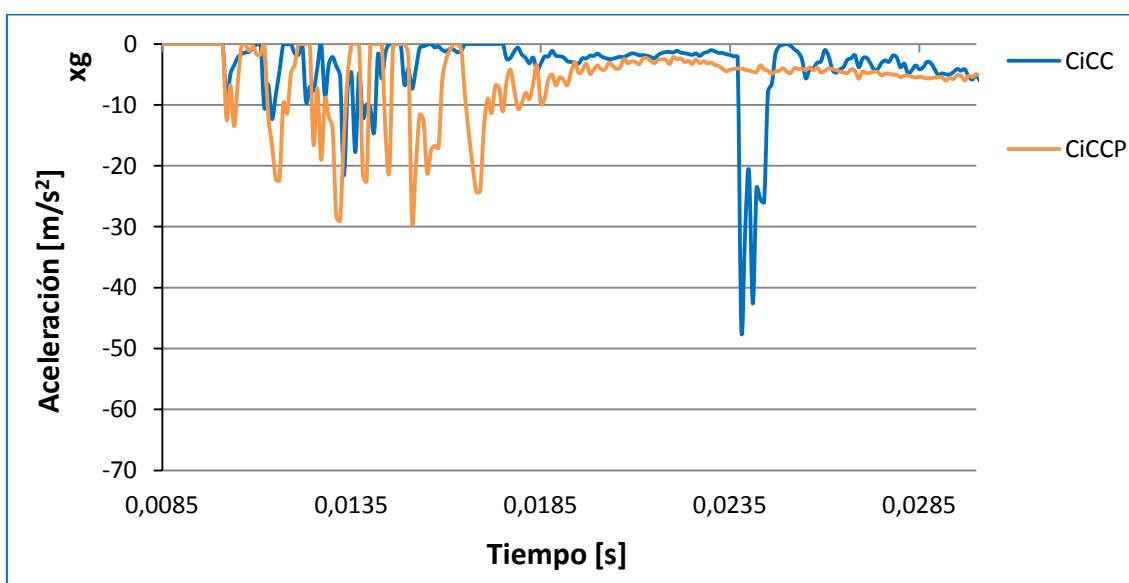


Ilustración 69. Modelos con la estructura de tronco de cono con placa y sin placa. Aceleración vs. Tiempo

4.4.3. Modelos con sección hexagonal y cuadrada.

Una vez comprobadas estas mejoras en los modelos circulares, se ha decidido incorporarlas a los modelos de sección cuadrada y hexagonal, para comprobar si estos modelos son más o menos eficientes. Además de las reacciones y aceleraciones también se compararán las energías específicas y la capacidad de absorber energía de los modelos para realizar un estudio más detallado.

Las Ilustraciones 70, 71, 72 y 73 muestran las reacciones y las aceleraciones de los análisis realizados para ambos tipos de secciones:

Tabla 14. Abreviaturas. Secciones Hexagonal y Cuadrada

Sección	Abreviatura	Sección	Abreviatura
Cuadrada	Cu	Hexagonal	He
Cuadrada con cono	CuCC	Hexagonal con cono	HeCC
Cuadrada con un agujero por pared lateral	Cu1A	Hexagonal con un agujero por pared lateral	He1A
Cuadrada con cono y un agujero por pared lateral	CuCC1A	Hexagonal con cono y un agujero por pared lateral	HeCC1A

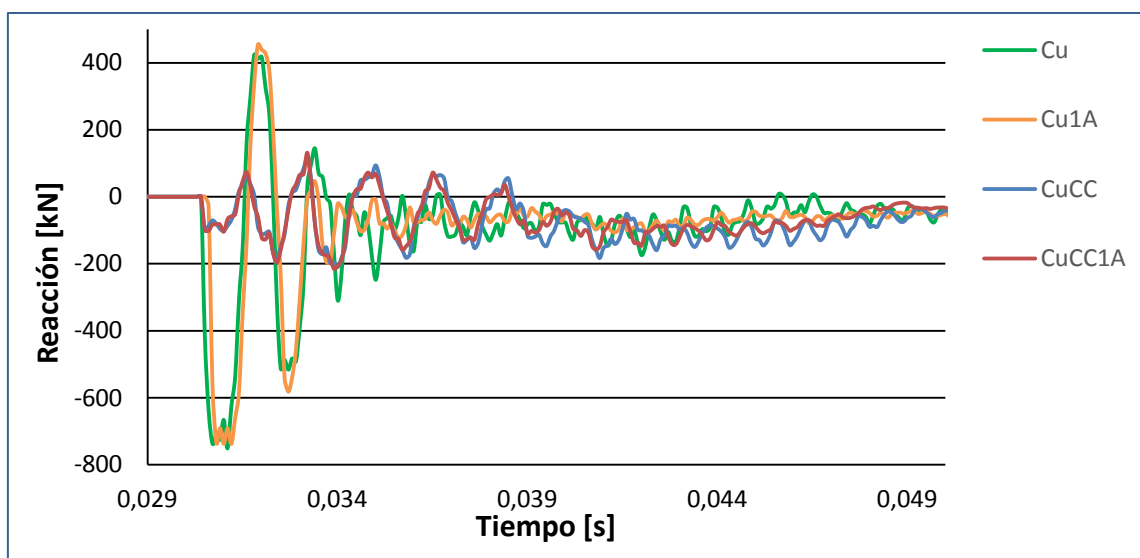


Ilustración 70. Modelos de sección cuadrada con tronco cónico y agujeros. Reacción vs. Tiempo

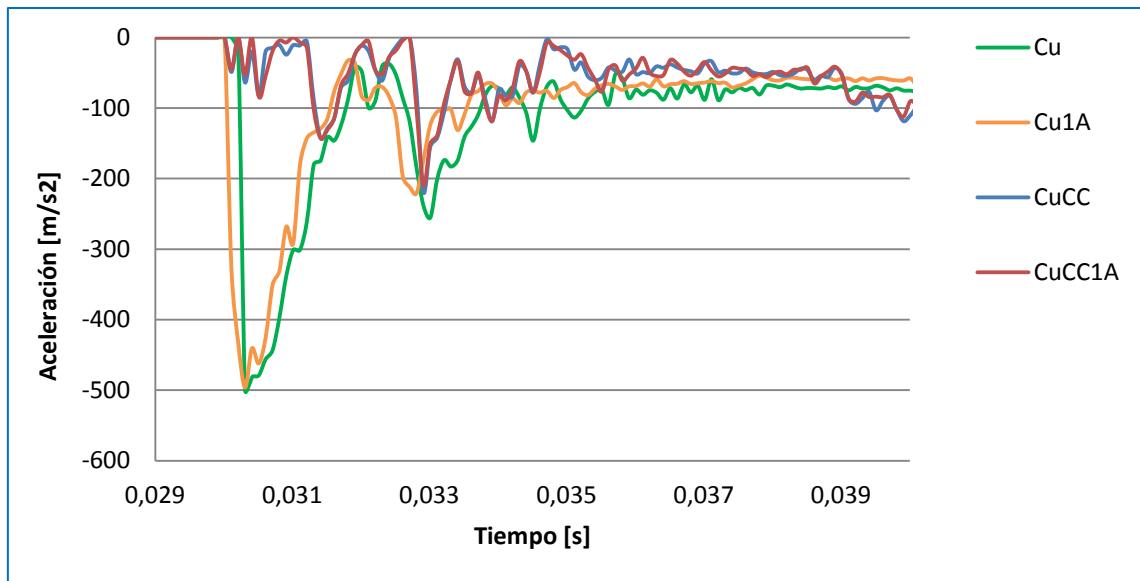


Ilustración 71. Modelos de sección cuadrada con tronco cónico y agujeros. Aceleración vs. Tiempo

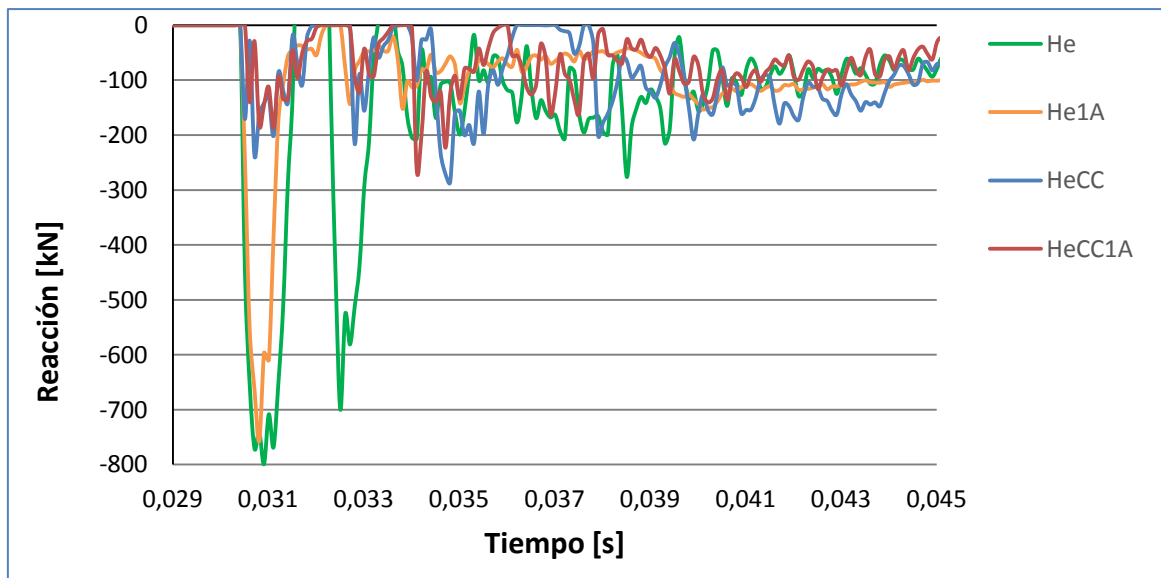


Ilustración 72. Modelos de sección hexagonal con tronco cónico y agujeros. Reacción vs. Tiempo

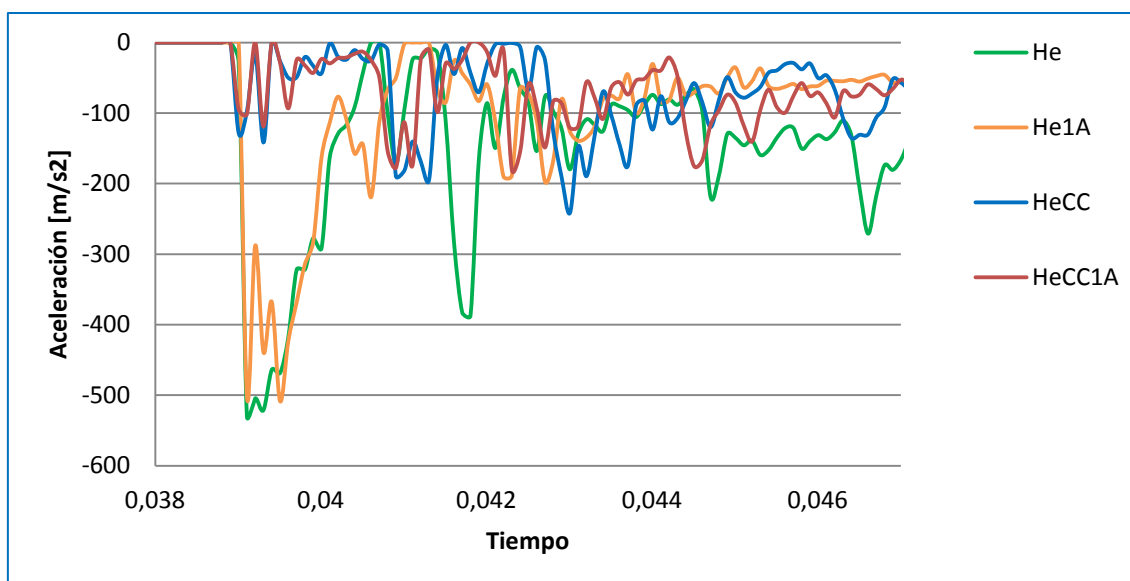


Ilustración 73. Modelos de sección hexagonal con tronco cónico y agujeros. Aceleración vs. Tiempo

4.4.4. Conclusiones. Fase 2.

Tras las simulaciones de esta segunda fase, se comprueba cómo el uso de aceleradores y la estructura de tronco cónico mejoran los modelos durante la colisión. El uso de agujeros o *triggers* perfecciona la forma de deformación de los diseños, mejorándose así la capacidad de absorber energía de estas estructuras y evitando un posible pandeo en la estructura. Los troncos cónicos además de reducir el pico de aceleración optimizan y retrasan dicha aceleración máxima.

Si se comparan los resultados de las secciones cuadrada y hexagonal se comprueba que sus resultados son parecidos, y que el uso tanto de tanto *triggers*, como de la estructura de tronco de cono reducen las aceleraciones máximas en aproximadamente un 50%.

4.5. Fase 3. Modelos multitubulares.

En esta parte se van a simular modelos de sección multitubular, es decir, varios tubos unidos y empotrados a la placa fija. Esos tubos son de sección menor a la utilizada en la primera fase. las estructuras tienen la misma longitud y están fabricados del mismo aluminio. A diferencia de los modelos de la fase 1, estos tendrán más resistencia y a la vez más masa. Se realizarán comparaciones para determinar qué modelos son los indicados para realizar los diseños de las siguientes fases ya que, como se comprobó en la fase 1, las estructuras de espesor menor no consiguen disipar

la energía en su totalidad. Las colisiones se realizarán con las mismas condiciones que la fase 1 exceptuando el cambio de espesor, en esta fase, por lo tanto, fundamentalmente se comprueba la resistencia que aportan las diferentes estructuras de sección multitubular.

4.5.1. Multitubo de sección cuadrada

La sección utilizada en este caso es un conjunto de prismas huecos de sección cuadrada situados uno al lado del otro de manera que se forme una red de tubos cuadrangulares, Ilustración 74.

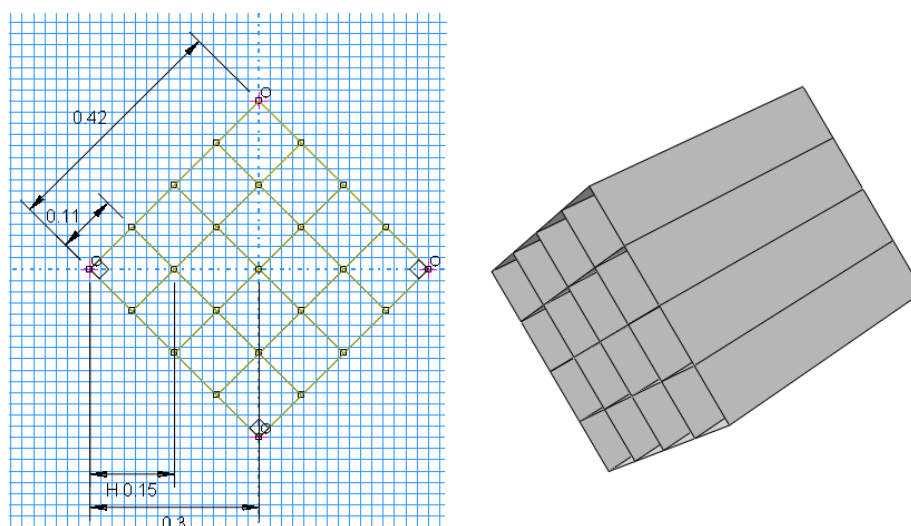


Ilustración 74. Dimensiones y modelo multitubular cuadrado

En las Ilustraciones 75 y 76 que muestran las reacciones en la placa fija de la topera y las aceleraciones del vehículo en movimiento. Estas tienen unos valores bastante más altos a los obtenidos en las simulaciones de los modelos básicos y por lo tanto, una mayor capacidad para absorber la energía en menos tiempo, aunque comprometiendo la comodidad de los pasajeros del vehículo.

Tabla 15. Abreviaturas sección multitubular cuadrada.

Sección	Abreviatura
Multitubo	
Cuadrada	MCu

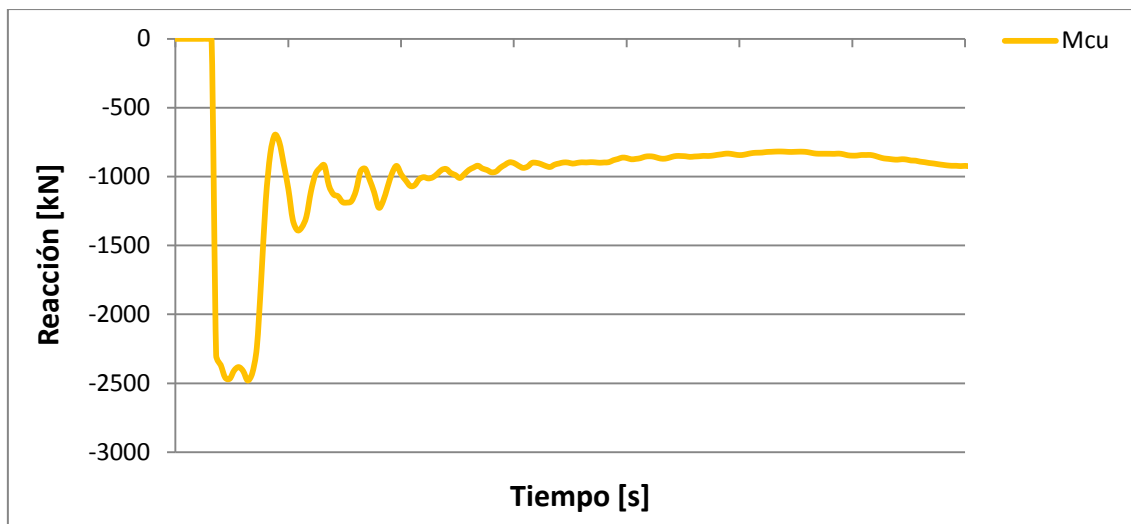


Ilustración 75. Reacción vs Tiempo. Modelo multitubular de sección cuadrada

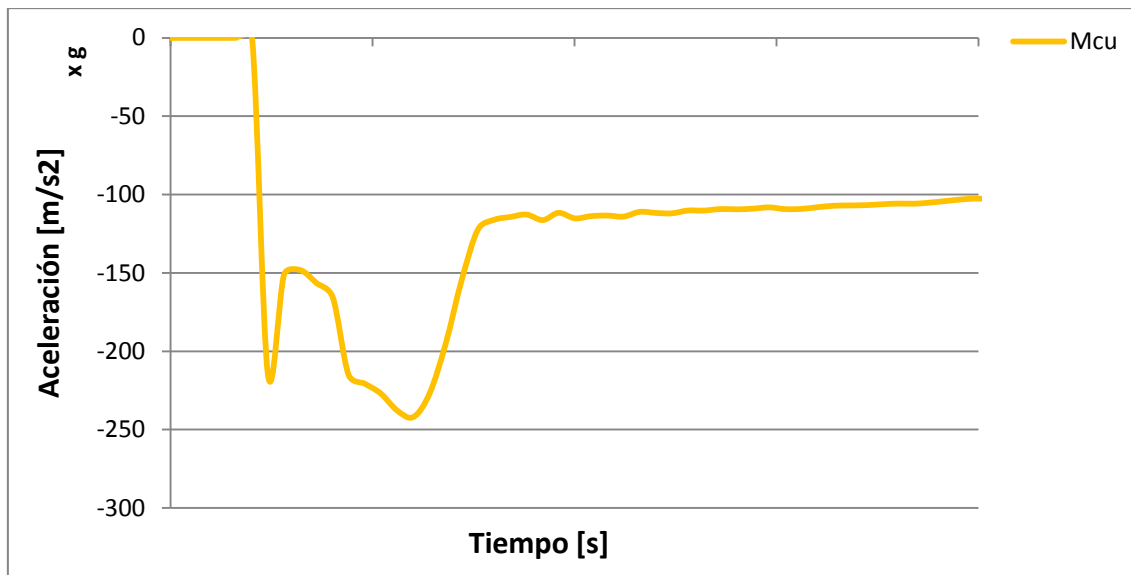


Ilustración 76. Aceleración vs. Tiempo. Modelo multitubular de sección cuadrada

4.5.2. Multitubo de sección circular

Dada la difícil organización de los elementos circulares en una sección, se van a estudiar diferentes configuraciones para comprobar cómo actúan frente a la colisión del vehículo ferroviario. Las simulaciones son iguales a las llevadas a cabo en los apartados anteriores con sus mismas condiciones de contorno. La Ilustración 77 muestra los tipos de secciones que se van a estudiar.

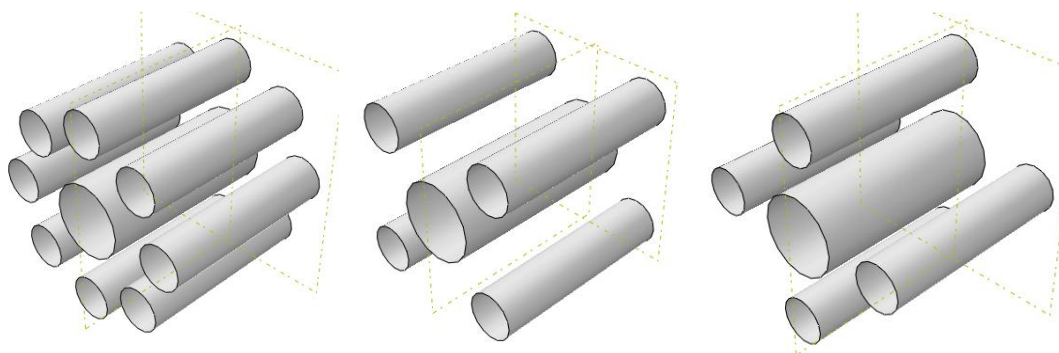


Ilustración 77. Modelos multitubulares de sección circular

La primera configuración está formada por 9 tubos, un tubo central rodeado por una corona de 8 tubos de radio más pequeño, la segunda es un modelo que mantiene el cilindro central y está rodeado por 4 tubos que forman 45° con respecto a los ejes principales, y la última es similar a la segunda pero los 4 tubos se sitúan sobre los ejes principales, Ilustración 78.

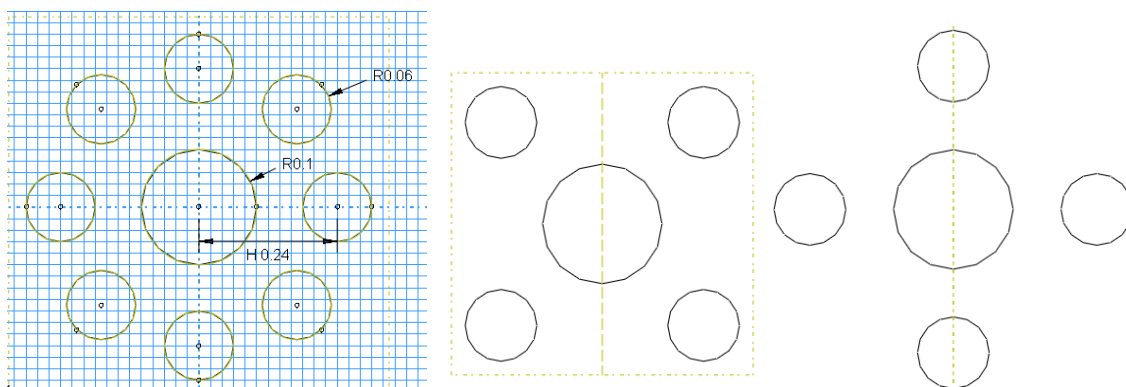


Ilustración 78. Dimensiones de los modelos multitubulares de sección circular

Las reacciones y aceleraciones de este tipo de secciones se muestran a continuación en las Ilustraciones 79 y 80.

Tabla 16. Abreviaturas sección multitubular circular.

Sección Multitubo	Abreviatura
Circular	MCi
Circular 45°	MCi2
Circular 90°	MCi2.1

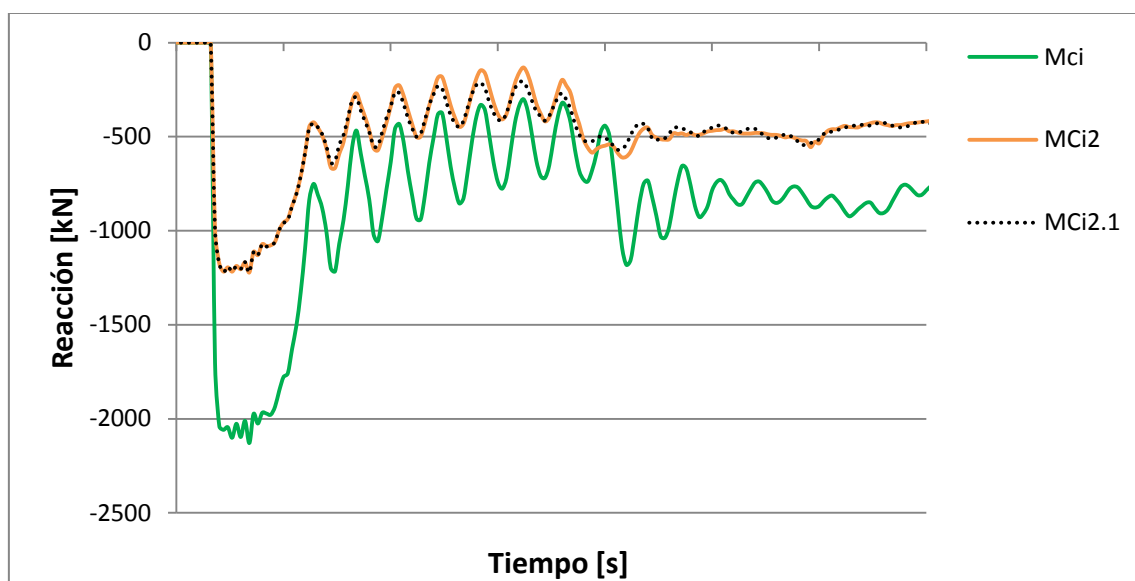


Ilustración 79. Reacción vs. Tiempo. Modelos multitubulares de sección circular

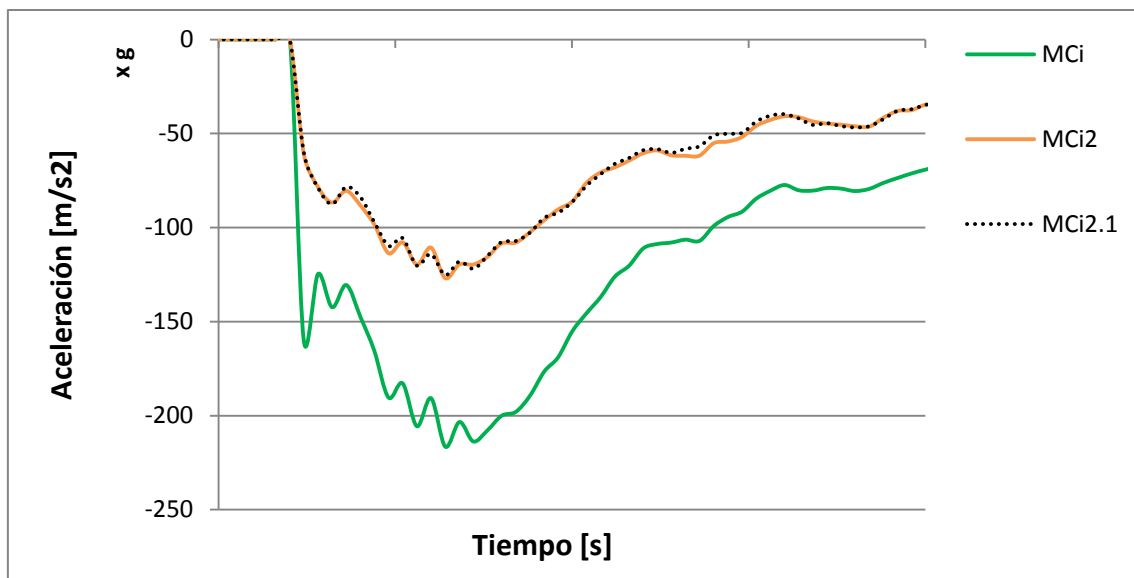


Ilustración 80. Aceleración vs. Tiempo. Modelos multitubulares de sección circular

4.5.3. Multitubo de sección hexagonal. Estructura con forma de panal.

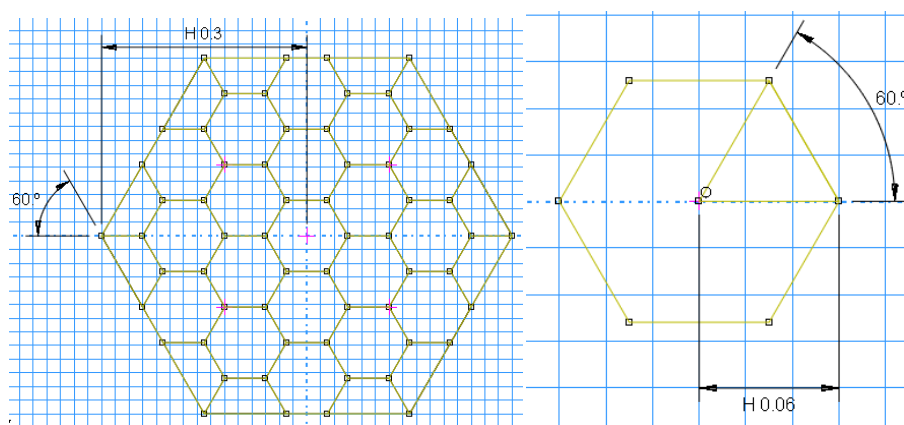
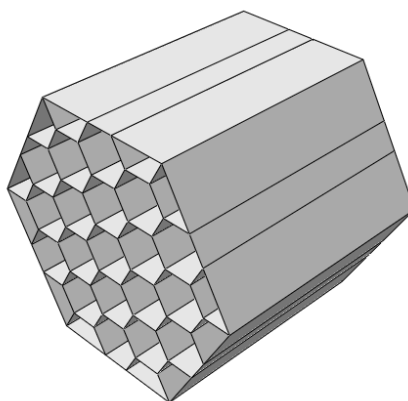


Ilustración 81. Modelos multitubular hexagonal, panal

En este apartado de la tercera fase se estudia un modelo de sección con forma de panel, esto es una sección constituida con varios tubos de sección hexagonal. Esta sección hexagonal tiene una gran similitud a la octogonal o la circular pero debido a las condiciones geométricas es sencillo organizar tubos hexagonales juntos dando lugar a una red tipo panel. Al igual que los demás modelos, las condiciones de contorno e interacciones entre elementos son iguales a las ya utilizadas. Las dimensiones utilizadas para cada hexágono que forma el diseño se describen en la Ilustración 81.

Las Ilustraciones 82 y 83 que se muestran a continuación, representan los resultados obtenidos de reacciones y aceleraciones para este modelo con forma de panel. Estos valores son, parecidos a los hallados en los modelos anteriores, unas reacciones en la placa fija y unas aceleraciones muy altas.

Tabla 17. Abreviaturas sección multitubular hexagonal.

Sección	Abreviatura
Multitubo	
Hexagonal	MHe
(Panal)	

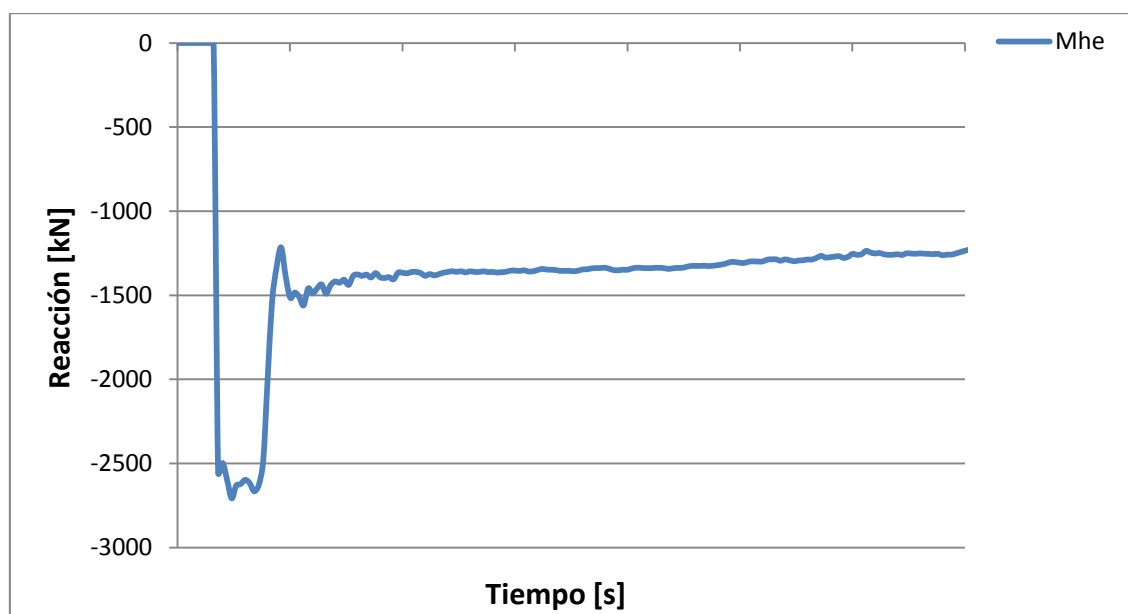


Ilustración 82. Reacción vs. Tiempo. Sección con forma de panel.

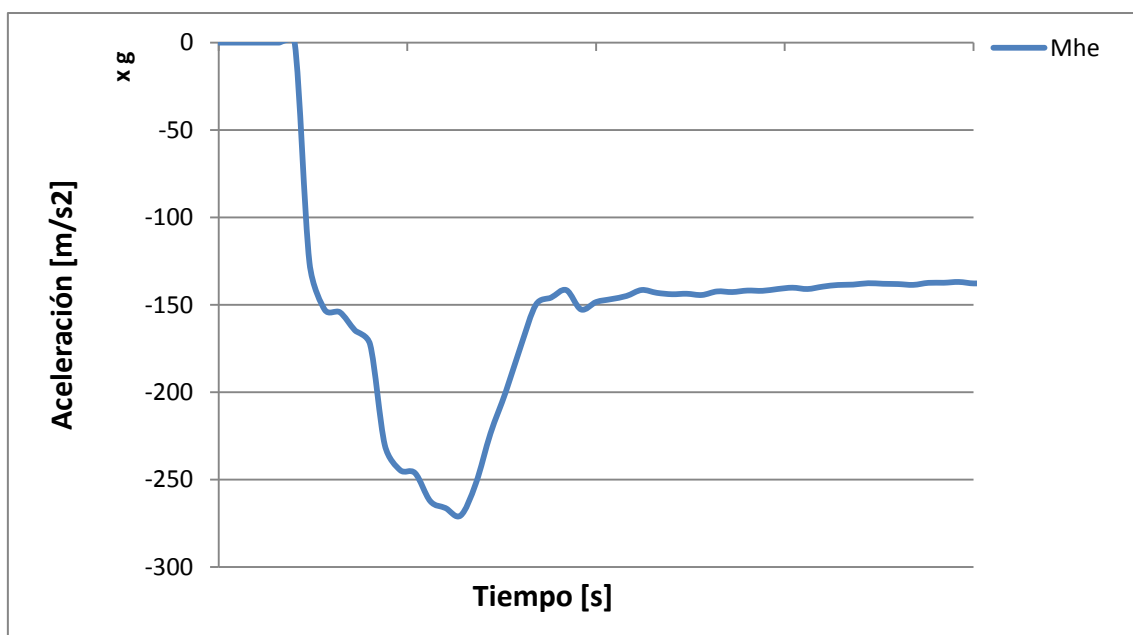


Ilustración 83. Aceleración vs. Tiempo. Sección con forma de panal.

4.5.4. Variables de interés. Fase 3.

Reacciones y aceleraciones

En este apartado se estudian los resultados obtenidos para las simulaciones de esta tercera fase, Ilustraciones 84 y 85. En primer lugar, se observa como la sección con forma de panal es la que tiene unas aceleraciones más altas a lo largo de todo el proceso de deformación. La estructura multitubular cuadrada la sigue con unas aceleraciones ligeramente más pequeñas, y por último los modelos de secciones circulares que presentan unas reacciones y aceleraciones menores debido a la difícil colocación geométrica de cilindros unos junto a otros. Las reacciones y aceleraciones de todos los modelos de esta fase son tan altas que se tendrán que utilizar estas estructuras como apoyo en caso de necesitar frenar el vehículo con brusquedad y no como parte principal de la estructura.

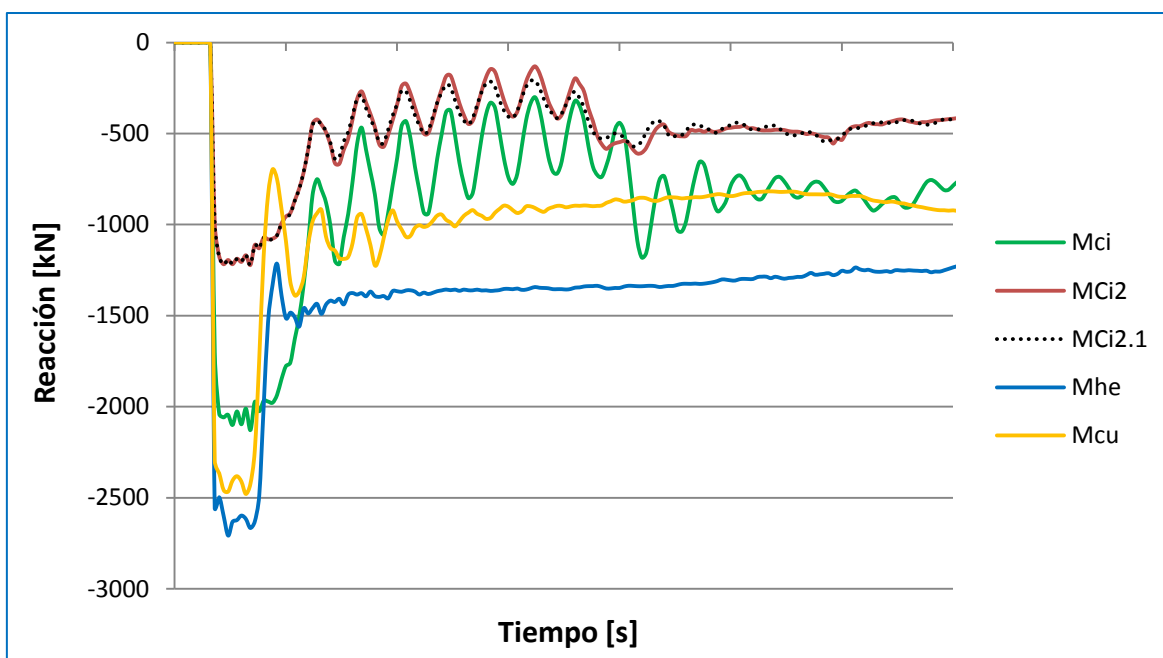


Ilustración 84. Reacción vs. Tiempo. Estructuras multitubulares

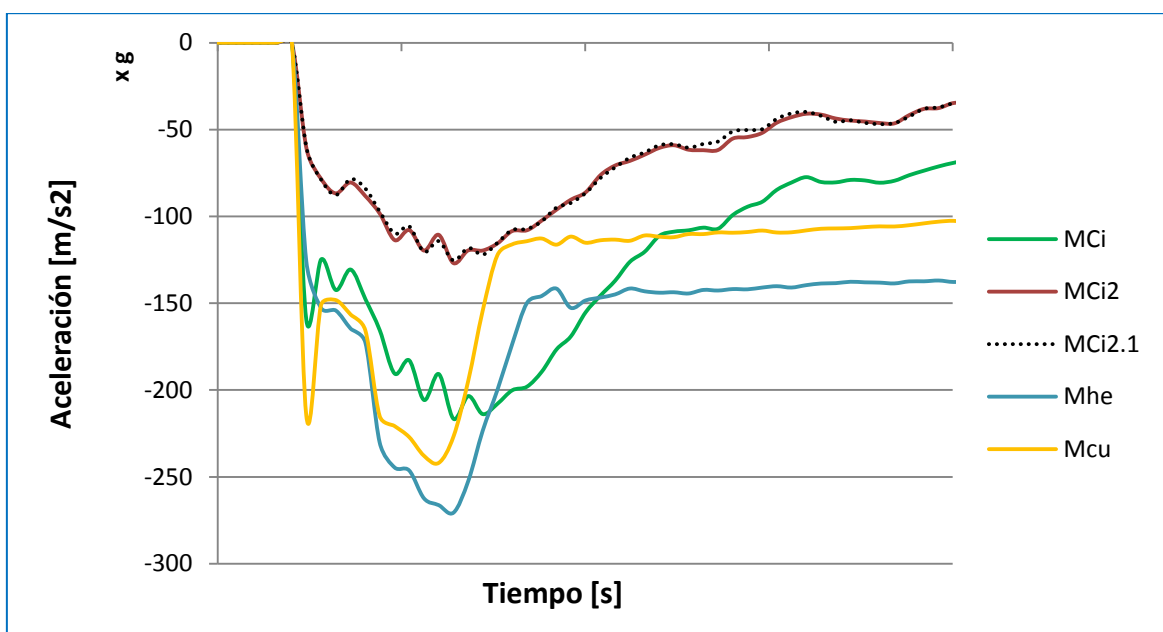


Ilustración 85. Aceleración vs. Tiempo. Estructuras multitubulares

Estructuras deformadas

Las deformaciones de las estructuras obtenidas para estos modelos son pequeñas si las comparamos con las resultantes de las simulaciones de la fase 1. La Ilustración 86 muestra las longitudes deformadas para los modelos de esta fase.

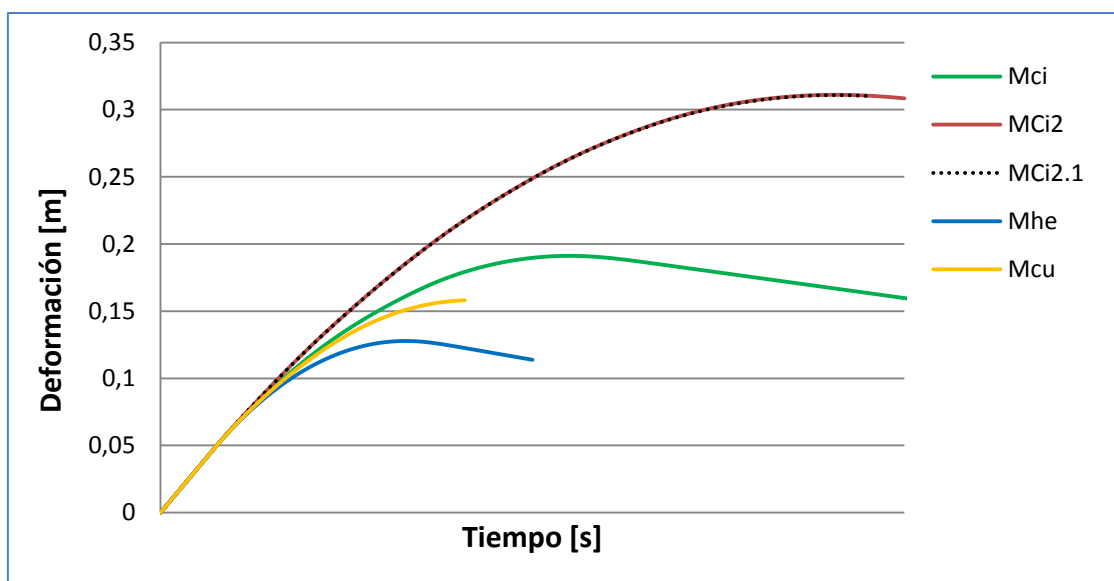


Ilustración 86. Modelos multitubulares. Deformación vs. Tiempo.

Energía absorbida

La energía absorbida como ya se explicó con anterioridad es un punto clave para definir qué estructura utilizar. En estos modelos la energía cinética se disipa con mayor rapidez que en apartados anteriores por la mayor rigidez que tienen. Para la comparación de los modelos se utilizan dos variables:

- Energía específica

La energía específica es el valor de energía que se absorbe por unidad de masa deformada, con esta variable se comprueba qué modelos de los simulados disipan de manera más eficiente la energía. La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos para estos modelos.

Tabla 18. Energía específica. Secciones multitubulares.

Tipo de sección	Energía específica [J/kg]
MultiCircular	34998.15
MultiCircular2	29439.17
MultiCircular2.1	29465.46
MultiCuadrada	39964.78
Panal	51877.62

- Capacidad de absorción de energía

La capacidad de absorción de energía indica la energía absorbida por una estructura por la longitud deformada. Cuanto mayor sea el pico de aceleración en el momento del impacto mayor será la capacidad de absorción de energía. La Tabla 19 muestra los valores que tiene esta variable tras las simulaciones.

Tabla 19. Capacidad de absorción de energía. Secciones multitubulares

Tipo de sección	Capacidad de absorción de energía [J/mm]
MultiCircular	797,04
MultiCircular 45°	431,03
MultiCircular 90°	431,03
MultiCuadrada	1040,14
Panal	1447,50

4.5.5. Conclusiones. Fase 3.

Tras la realización de esta tercera fase se concluye que estructuras formadas por varios tubos unidos entre sí son más rígidas que aquellas formadas por un solo tubo de sección básica, a cambio se produce un pico de aceleración de un mayor valor. Por lo tanto la utilización conjunta de ambos tipos de estructuras sería lo ideal.

Los resultados obtenidos tras la simulación muestran cómo los modelos con sección multicuadrada y con forma de panal mantienen unas aceleraciones parecidas mejorando la capacidad de absorber energía respecto a los tres tipos modelos de

sección circular, que tienen una capacidad de absorber energía más limitada pero unas aceleraciones resultantes menores. La elección del modelo será en función de las necesidades de diseño de la estructura.

4.6. Fase Final. Modelos de doble estructura.

En esta última fase se van a utilizar todas las conclusiones de las fases anteriores para el diseño del modelo óptimo final que cumpla las condiciones iniciales del problema. Este diseño estará formado por dos estructuras, la primera es la que se sitúa en el vehículo en movimiento, la segunda es la situada al final de la vía, que está formada, esta última, por los diferentes modelos estudiados a lo largo del proyecto. Desde el extremo de la estructura encontraremos, en primer lugar, un tronco de cono que soluciona el problema del efecto impacto y baja la aceleración inicial que se produce justo tras la colisión. La siguiente estructura es una con sección básica que absorbe parte de la energía cinética pero no en su totalidad, y por ello que se añade una estructura de sección multitubular que actuará como freno final. Así mismo, se utilizarán diferentes espesores para alcanzar la solución que optimice las variables definidas en el proyecto.

4.6.1. Modelo 1

Introducción

El primer modelo creado es un modelo que se compone de cuatro estructuras, dos troncos de cono, uno de ellos empotrado a la placa móvil y el otro en la estructura empotrada a la placa fija, que evitarán las altas aceleraciones y reacciones al inicio de la colisión, una parte de sección hexagonal con agujeros que se utilizará como primera parte para absorber la energía y una última parte de sección con forma de panal para absorber la energía que no se pudo disipar en la estructura de sección hexagonal. Estos tres últimos elementos constituyen la topera, mientras que el primero de los troncos de cono forma parte del tren, Ilustración 87.

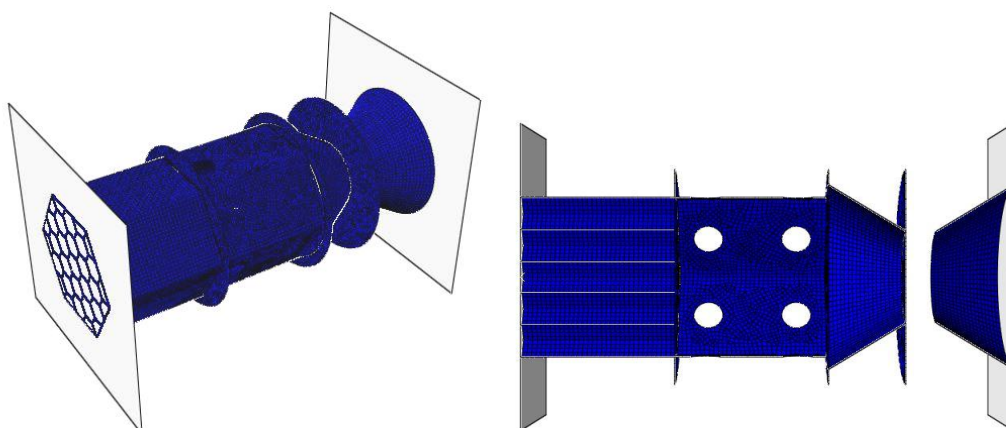


Ilustración 87. Modelo 1. Fase Final.

Estas estructuras tienen distintos espesores y longitudes con el objetivo de optimizar el modo de absorber energía. En este primer modelo las dimensiones son muy aproximadas a las utilizadas en fases anteriores Tabla 20 e Ilustración 88.

Tabla 20. Dimensiones Modelo 1.

Estructura	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Multihexagonal (Panal)	500	1
Hexagonal con 12 agujeros	500	1.5
Troncos de cono	250	1.25
Placas intermedias	-	1

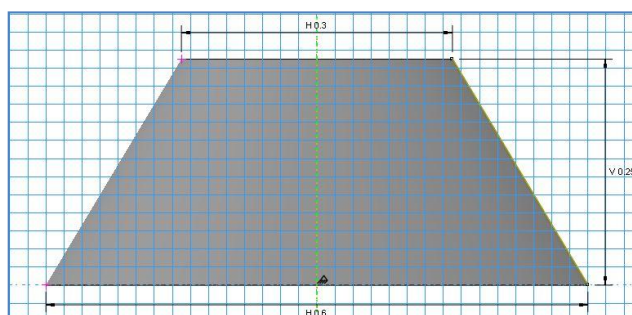
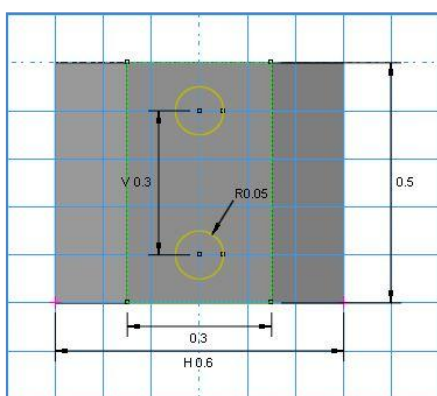


Ilustración 88. Dimensiones de la sección hexagonal y tronco cónico. Modelo 1.

Resultados

Tras la simulación del modelo se van a estudiar las diferentes variables que se mencionaron anteriormente.

La Ilustración 89 muestra las reacciones que se dan en la placa fija en función del tiempo. La ilustración 90 muestra las aceleraciones que experimenta la placa que representa al tren a lo largo de todo el impacto. Como se puede observar, existe un pico tanto de reacciones como de aceleraciones al inicio de la colisión que representa el primer contacto entre los troncos cónicos. También podemos encontrar en otros instantes de tiempo, pequeños picos que indican un cambio de sección. Por último, una drástica disminución de la reacción, y como consecuencia, de la aceleración en el momento que la colisión alcanza la zona multitubular.

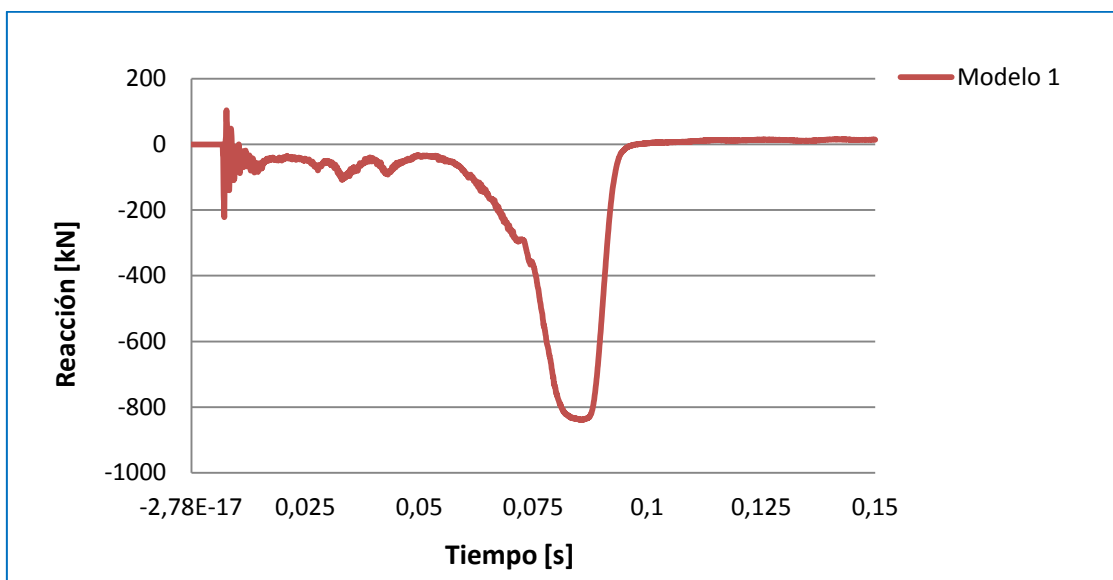


Ilustración 89. Modelo 1. Reacción vs. Tiempo.

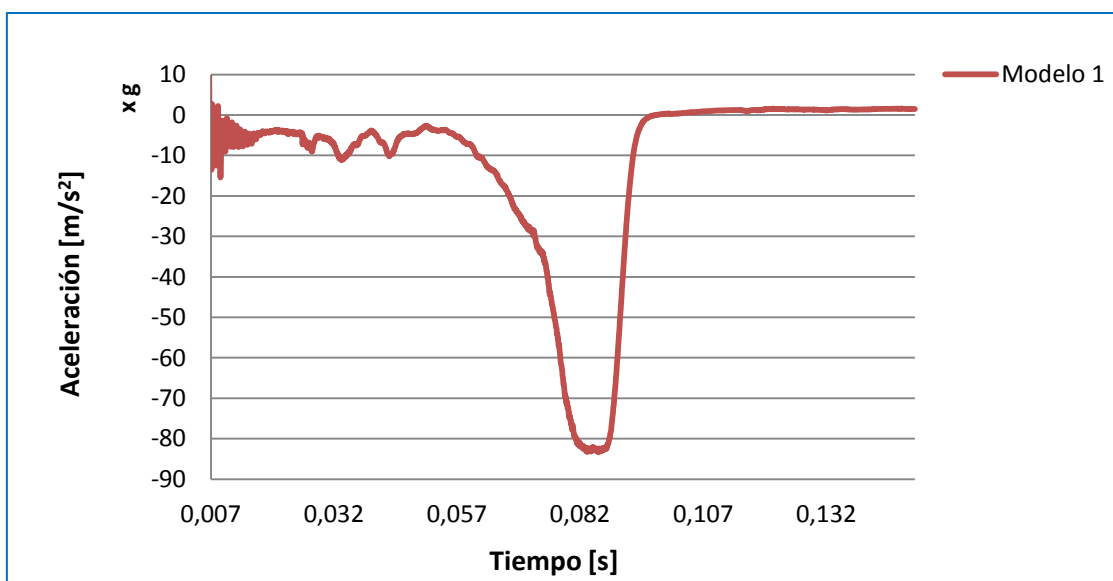


Ilustración 90. Modelo 1. Aceleración vs. Tiempo.

Como era de esperar este modelo consigue con creces disipar toda la energía obteniendo, Ilustración 91. Como se podía prever la energía disminuye de manera drástica con el paso a la sección multitubular.

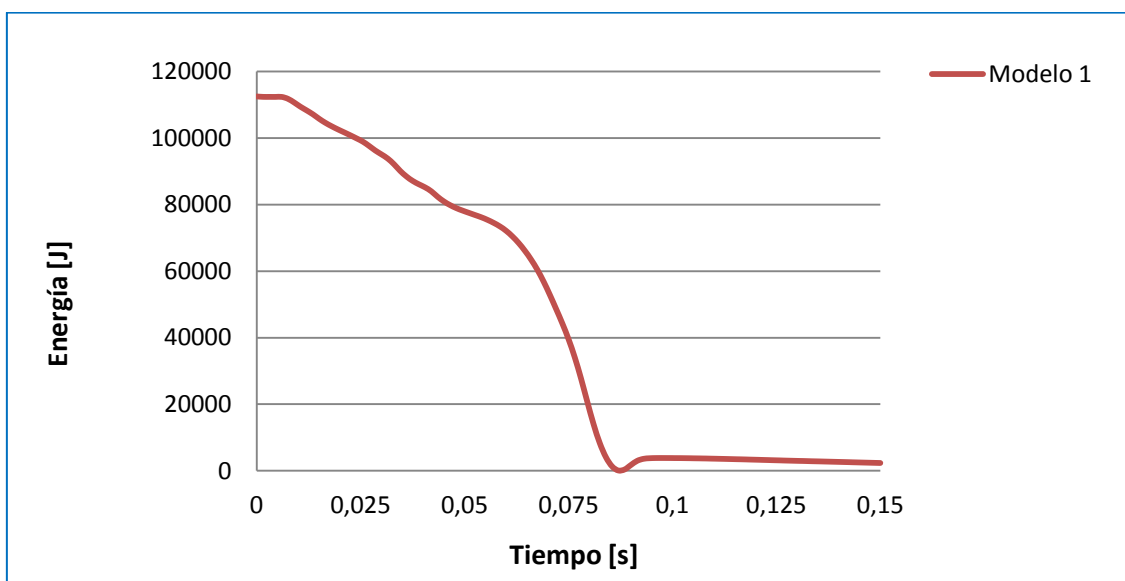


Ilustración 91. Modelo 1. Energía vs. Tiempo.

A continuación se muestra el proceso de deformación de la estructura en la Ilustración 92 en diferentes instantes de tiempo. La deformación de la estructura es como se esperaba, aunque debido a la gran rigidez del modelo de sección con forma de panel no se deforma por completo.

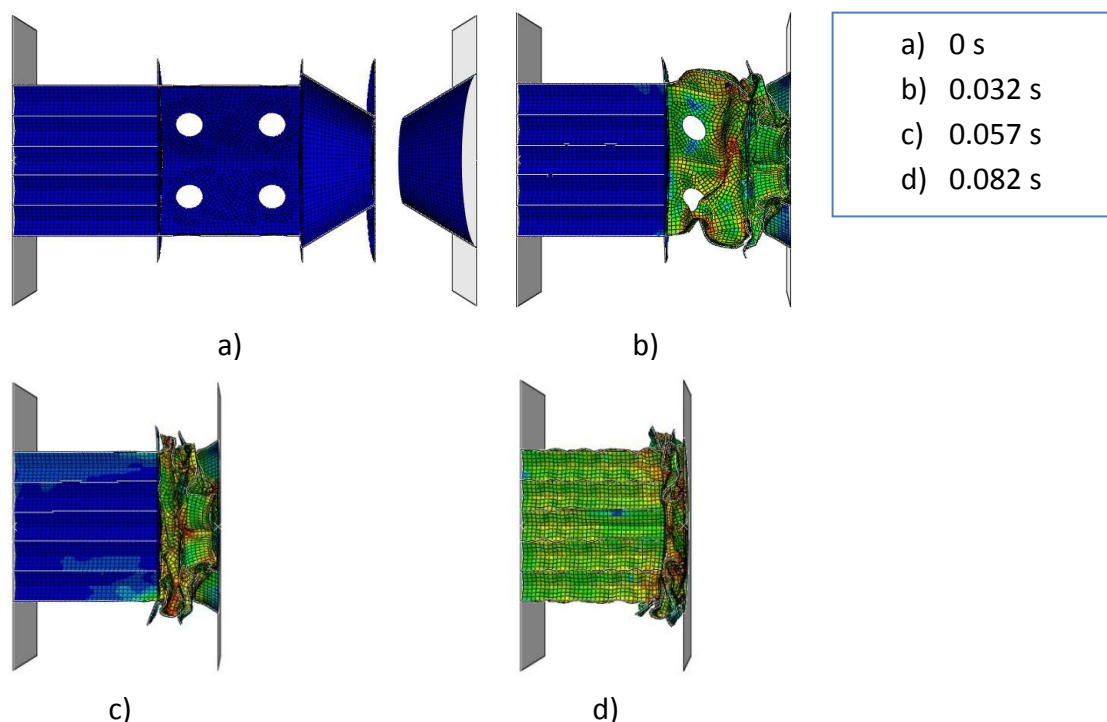


Ilustración 92. Proceso de deformación del modelo 1.

Variables de interés

- Longitud deformada de la estructura:

$$\Delta L = 0.94 \text{ m}$$

- Masa de la estructura total:

$$m = 17.43 \text{ kg}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto antes de la deformación de la estructura de sección multitubular:

$$\text{Reacción máxima} = 221.56 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 15.46 \text{ g}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto de todo el impacto:

$$\text{Reacción máxima} = 839.46 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 83.38 \text{ g}$$

- Energía específica del modelo:

$$Ee = 10300.44 \text{ J/kg}$$

- Capacidad de absorción de energía del modelo:

$$Ca = 119.68 \text{ J/mm}$$

Conclusiones

Si comparamos los resultados obtenidos con los de las fases anteriores se puede comprobar cómo se han optimizado ligeramente la capacidad de absorción de energía, y se han reducido las reacciones y aceleraciones iniciales. Por otro lado, la estructura final multitubular apenas se deforma y se generan unos picos de reacción y aceleración de gran valor, y por tanto esta solución al problema no sería óptima, ilustración 93.

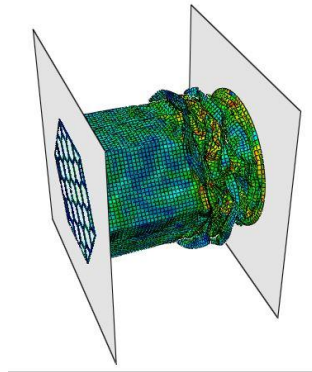


Ilustración 93. Estructura deformada. Modelo 1.

4.6.2. Modelo 2

Este segundo modelo de la última fase estará compuesto por cuatro estructuras, dos troncos de cono, una parte de sección hexagonal con agujeros y una última parte de sección multicircular que ayudará a la frenada completa del vehículo, Ilustración 94.

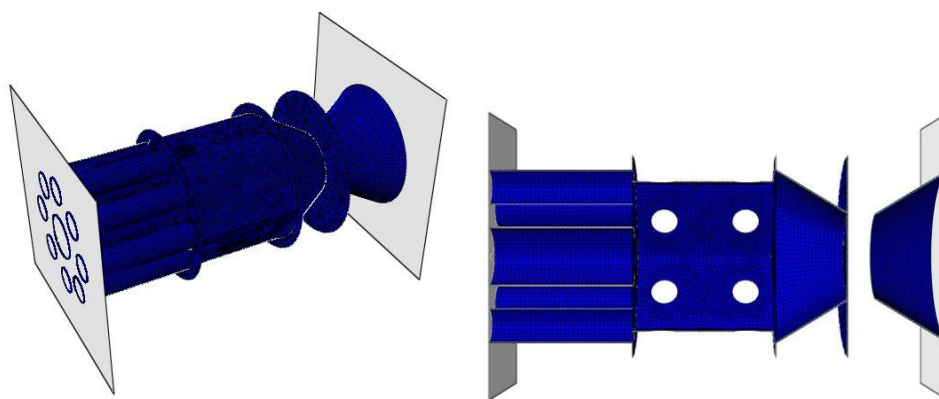


Ilustración 94. Modelo 2. Fase Final.

La utilización de la sección multicircular en vez de la sección multihexagonal utilizada en el modelo anterior se propone como forma de reducir el pico de reacción y aceleración que aparecía en el segundo.

Las dimensiones de las partes que forman la estructura del segundo modelo son las mostradas en la Tabla 21.

Tabla 21. Dimensiones Modelo 2.

Estructura	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Multicircular	500	1.25
Hexagonal con 12 agujeros	500	1.5
Troncos de cono	250	1.25
Placas intermedias	-	1

Resultados

Tras la simulación del modelo se muestran los resultados de las reacciones en la placa fija, las aceleraciones del tren y el modo que tiene la estructura de disipar la energía.

Las ilustraciones 95 y 96 muestran las reacciones y aceleraciones del modelo. Al igual que el modelo anterior, existen tres zonas en las que aparecen picos relevantes de reacciones y aceleraciones: la que corresponde al impacto inicial, la intermedia que

se corresponde con los cambios de sección y deformación de la zona hexagonal, y la última, correspondiente al modelo multitubular.

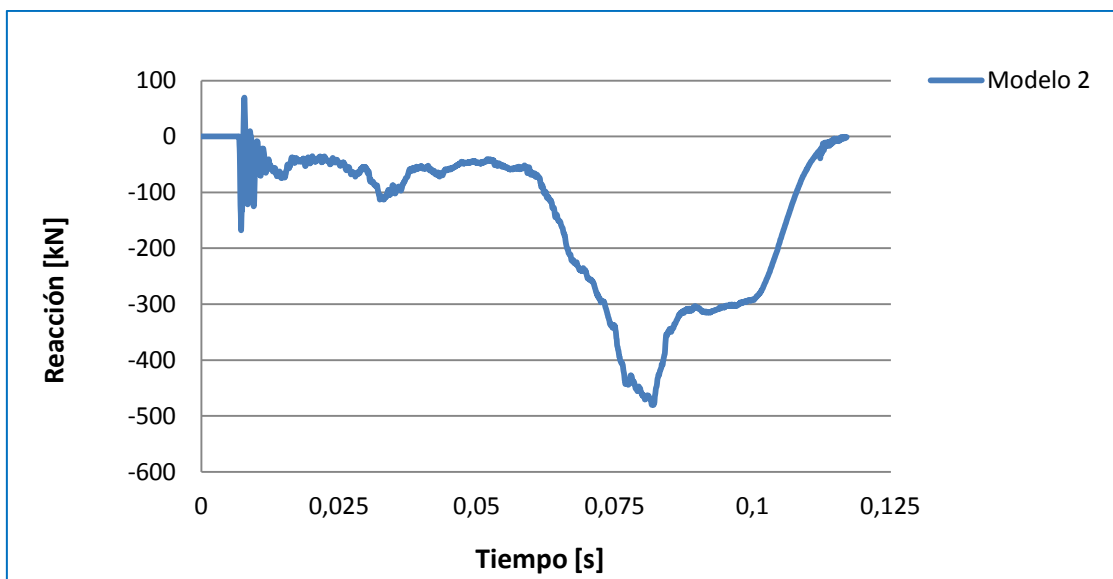


Ilustración 95. Modelo 2. Reacción vs. Tiempo.

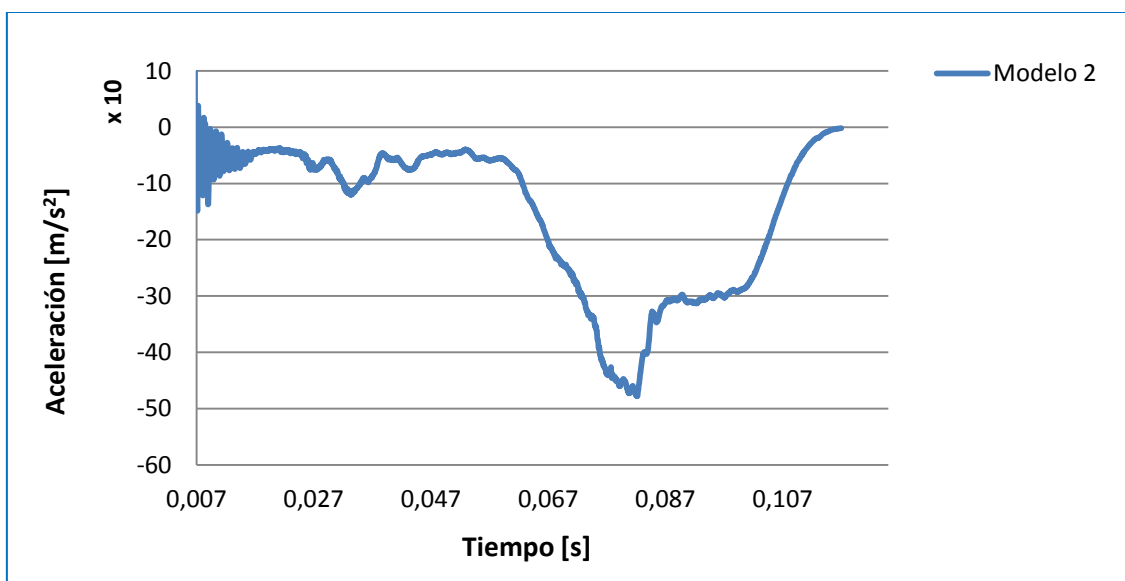


Ilustración 96. Modelo 2. Aceleración vs. Tiempo.

La ilustración 97, muestra cómo se disipa la energía en este modelo. Se observa una disminución de la energía, aproximadamente 0,06 s, debida al cambio de sección a la multitubular pero menos drástica que la obtenida en el modelo 1.

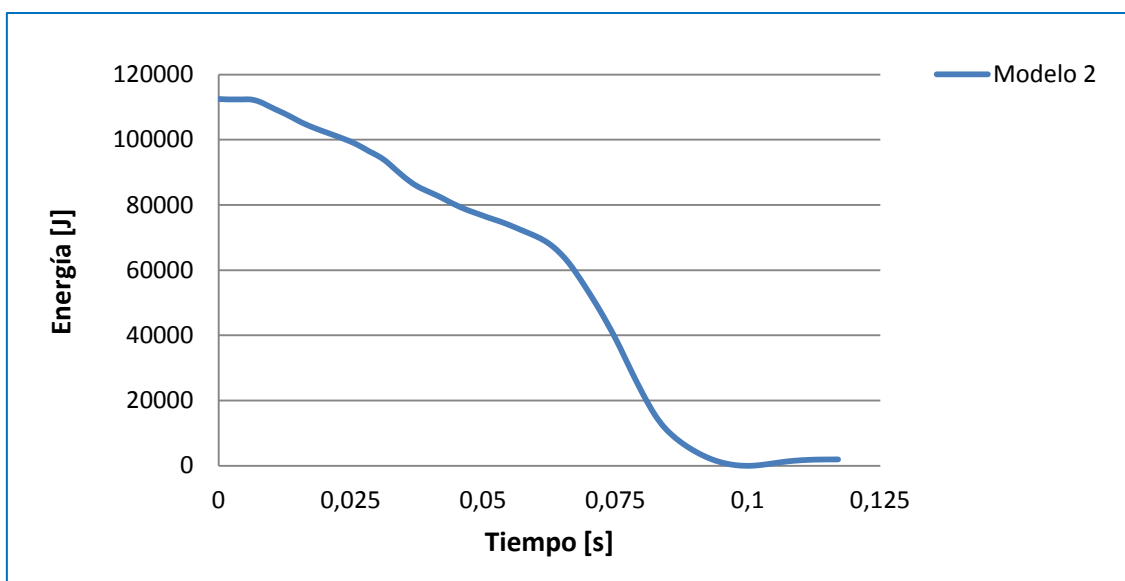


Ilustración 97. Modelo 2. Energía vs. Tiempo.

A continuación se muestra el proceso de deformación de la estructura en la Ilustración 98 en diferentes instantes de tiempo. Se puede observar que aun cambiando la sección no se consigue una deformación completa.

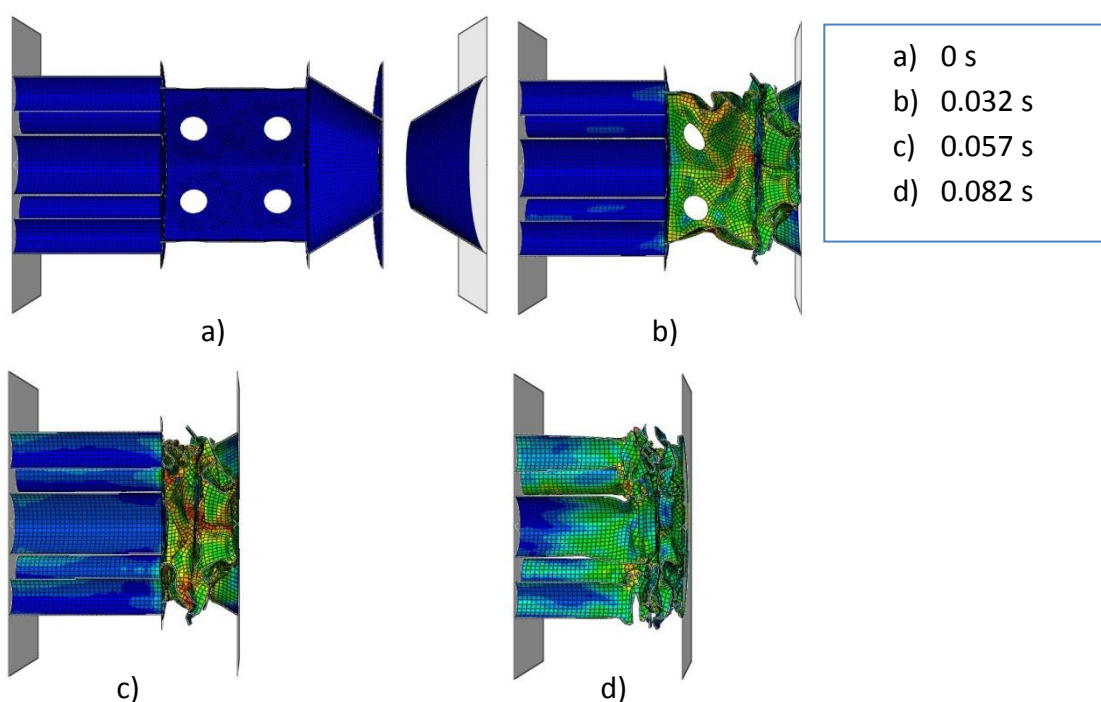


Ilustración 98. Proceso de deformación del modelo 2.

Variables de interés

- Longitud deformada de la estructura:

$$\Delta L = 0.97 \text{ m}$$

- Masa de la estructura total:

$$m = 15.30 \text{ kg}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto antes de la deformación de la estructura de sección multitubular:

$$\text{Reacción máxima} = 167.80 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 14.86 \text{ g}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto de todo el impacto:

$$\text{Reacción máxima} = 479.98 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 47.81 \text{ g}$$

- Energía específica del modelo:

$$Ee = 11314.84 \text{ J/kg}$$

- Capacidad de absorción de energía del modelo:

$$Ca = 115.41 \text{ J/mm}$$

Conclusiones

Comparando los dos modelos simulados en esa fase, se observa cómo este segundo modelo consigue reducir significativamente las reacciones y aceleraciones con respecto al modelo 1 en aproximadamente un 55%. Además, se consigue aumentar en un 10% la energía específica absorbida. Aún habiéndose conseguido una mejora importante, esta estructura todavía tendría margen de mejora pues la estructura de sección multitubular no se deforma al completo, y los picos de reacciones y aceleraciones que se producen todavía son ligeramente altos, Ilustración 99.

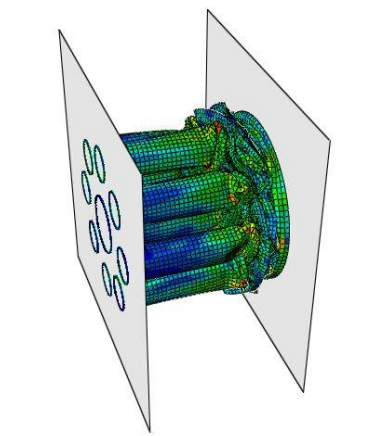


Ilustración 99. Estructura deformada. Modelo 2.

4.6.3. Modelo 3.

En el siguiente modelo se siguen utilizando las cuatro partes características de la estructura con el cambio de espesor en la parte multicircular a 1 mm, ver Tabla 22. Se espera que se deforme al completo la estructura.

Tabla 22. Dimensiones Modelo 3.

Estructura	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Multicircular	500	1
Hexagonal con 12 agujeros	500	1.5
Troncos de cono	250	1.25
Placas intermedias	-	1

Resultados

Tras la simulación del modelo se muestran los resultados de las reacciones en la placa fija, las aceleraciones del tren y el modo que tiene la estructura de disipar la energía.

En primer lugar, se muestran las reacciones en la placa fija y las aceleraciones de la placa móvil, Ilustraciones 100 y 101. En este caso, se consigue reducir ligeramente el pico de reacción y aceleración final pero no lo suficiente como para ser igual al obtenido al inicio del impacto.

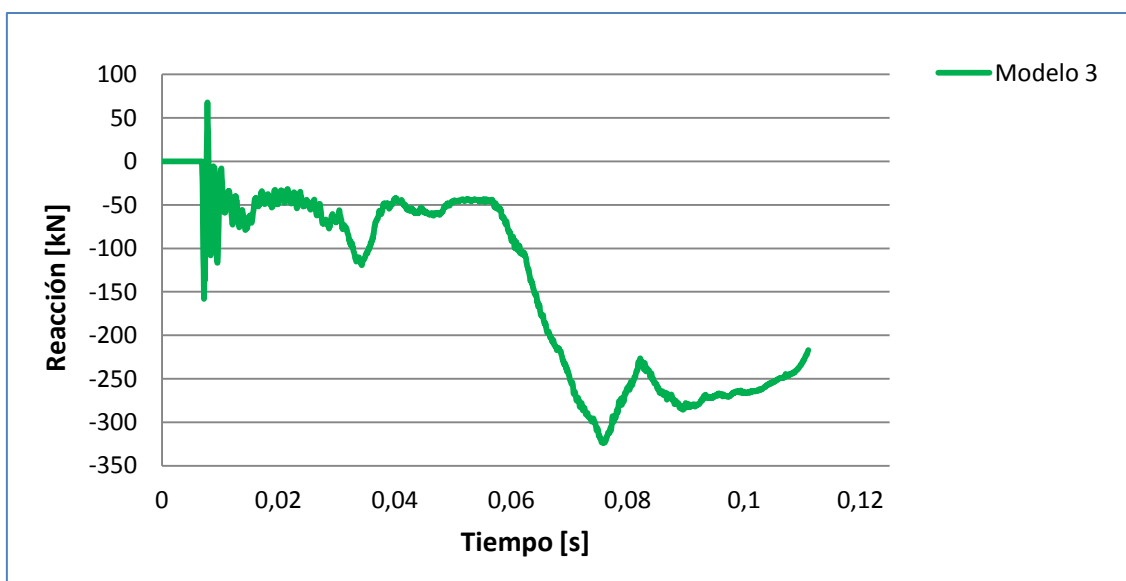


Ilustración 100. Modelo 3. Reacción vs. Tiempo.

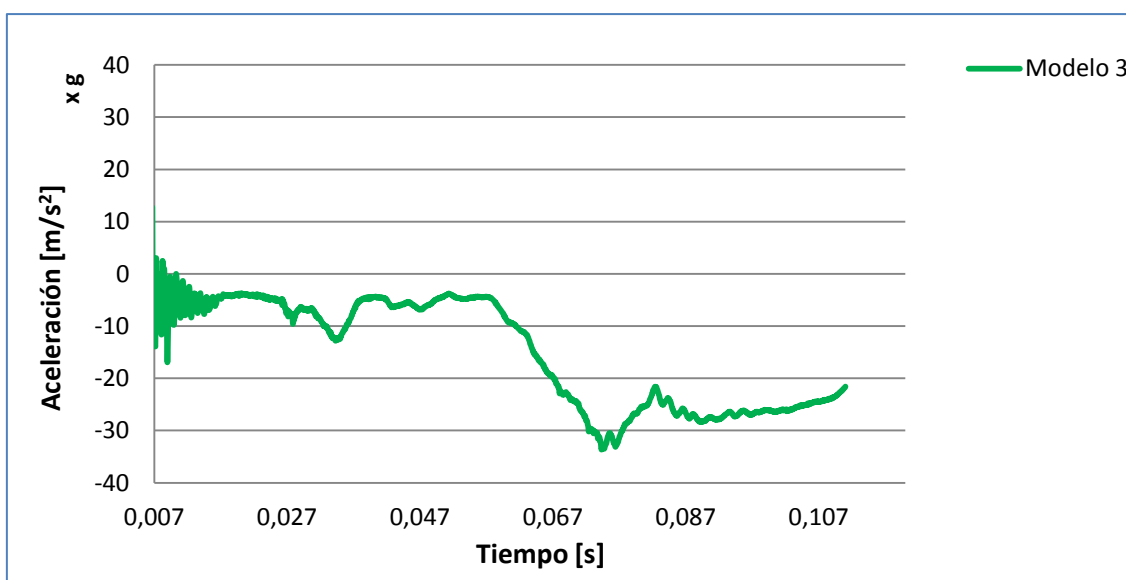


Ilustración 101. Modelo 3. Aceleración vs. Tiempo.

La ilustración 102, muestra como se disipa la energía en este modelo. La gráfica es muy parecida a la del modelo anterior pero con un pequeño aumento de la pendiente debido a la disminución del espesor.

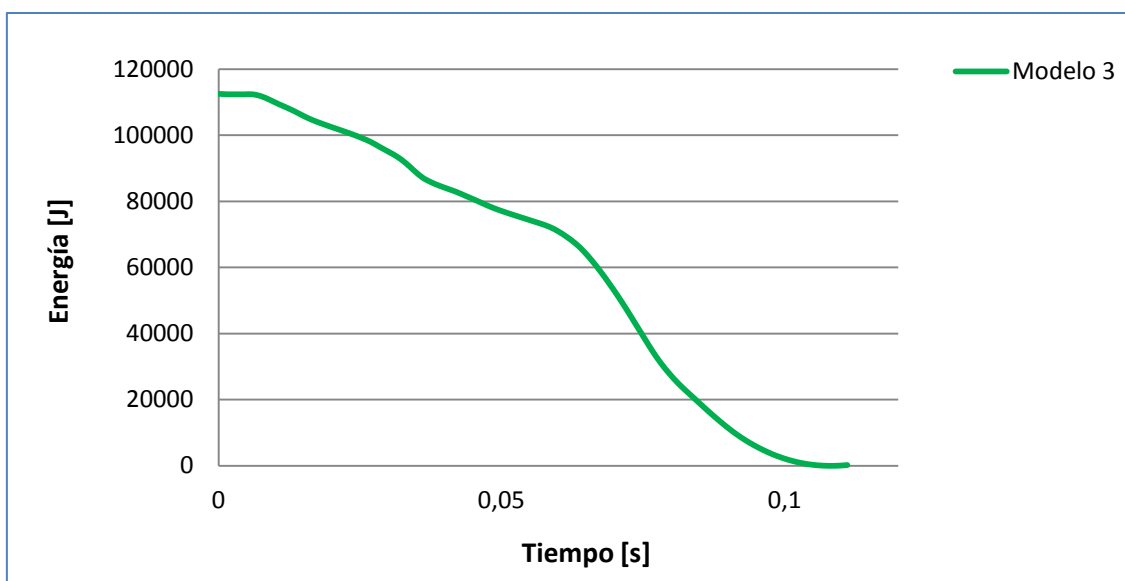


Ilustración 102. Modelo 3. Energía vs. Tiempo.

A continuación se muestra el proceso de deformación de la estructura en la Ilustración 103 en diferentes instantes de tiempo.

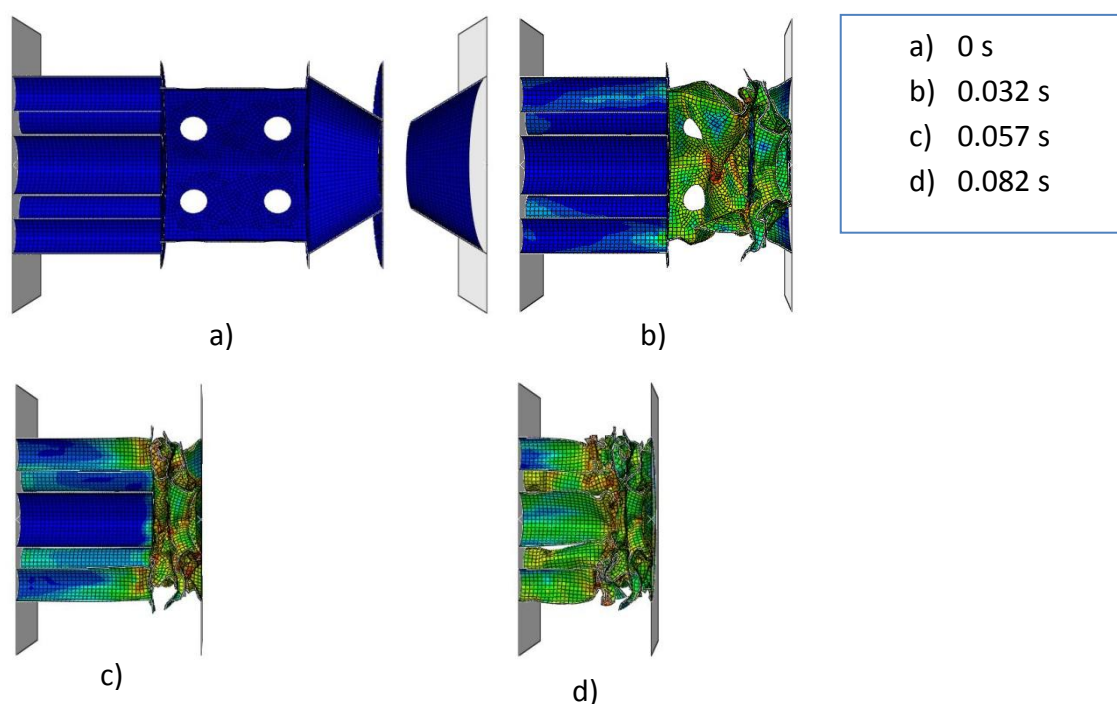


Ilustración 103. Proceso de deformación del modelo 3.

Variables de interés

- Longitud deformada de la estructura:

$$\Delta L = 1.02 \text{ m}$$

- Masa de la estructura total:

$$m = 14.07 \text{ kg}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto antes de la deformación de la estructura de sección multitubular:

$$\text{Reacción máxima} = 158.19 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 16.94 \text{ g}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto de todo el impacto:

$$\text{Reacción máxima} = 323.78 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 33.66 \text{ g}$$

- Energía específica del modelo:

$$Ee = 11774.06 \text{ J/kg}$$

- Capacidad de absorción de energía del modelo:

$$Ca = 110.44 \text{ J/mm}$$

Conclusiones

La disminución del espesor realizada en este modelo no alcanza los resultados esperados. La disminución del pico de reacción y aceleración no es suficiente. Además, se producen pequeños pandeos en la estructura. Estos pandeos disminuye la capacidad de absorción de la energía por lo que la hacen ineficiente, Ilustración 104.

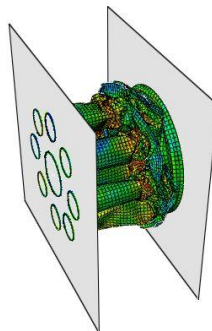


Ilustración 104. Estructura deformada. Modelo 3.

4.6.4. Modelo 4.

En este modelo se estudia un modelo similar al 3 pero con una longitud tal que se evite el pandeo. La Ilustración 105 muestra este modelo.

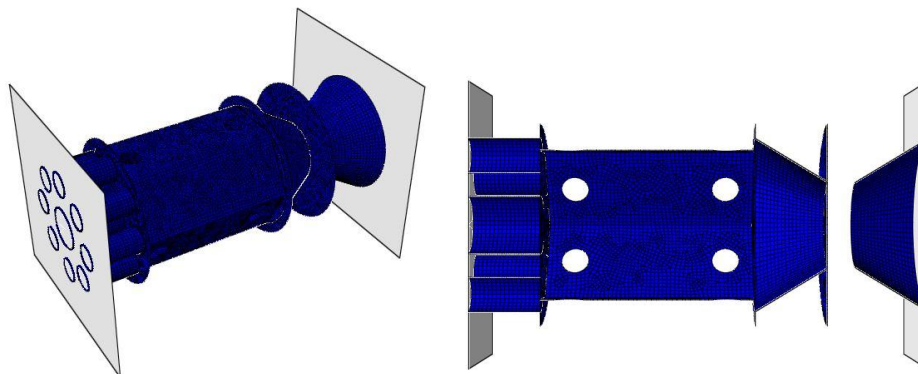


Ilustración 105. Modelo 4

Se espera que tras el cambio de longitud de la estructura se mejore la capacidad de absorber energía del modelo, se disminuyan las altas reacciones y aceleraciones y se eviten los pandeos. La Tabla 23 y la Ilustración 106 muestran las longitudes y espesores del modelo 4.

Tabla 23. Dimensiones Modelo 4.

Estructura	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Multicircular	250	1
Hexagonal con 12 agujeros	1000	1.5
Troncos de cono	250	1.25
Placas intermedias	-	1

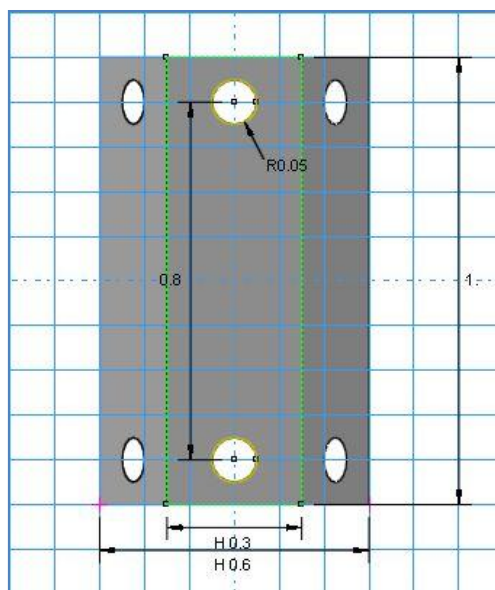


Ilustración 106. Dimensiones de la sección hexagonal. Modelo 4.

Resultados

Las reacciones y aceleraciones resultantes tras la simulación de este modelo son parecidas a las obtenidas en el modelo anterior con una ligera disminución en el momento en que se deforma la sección multitubular. La ilustración 107 muestra las reacciones de la placa fija y la Ilustración 108 las aceleraciones de la placa móvil.

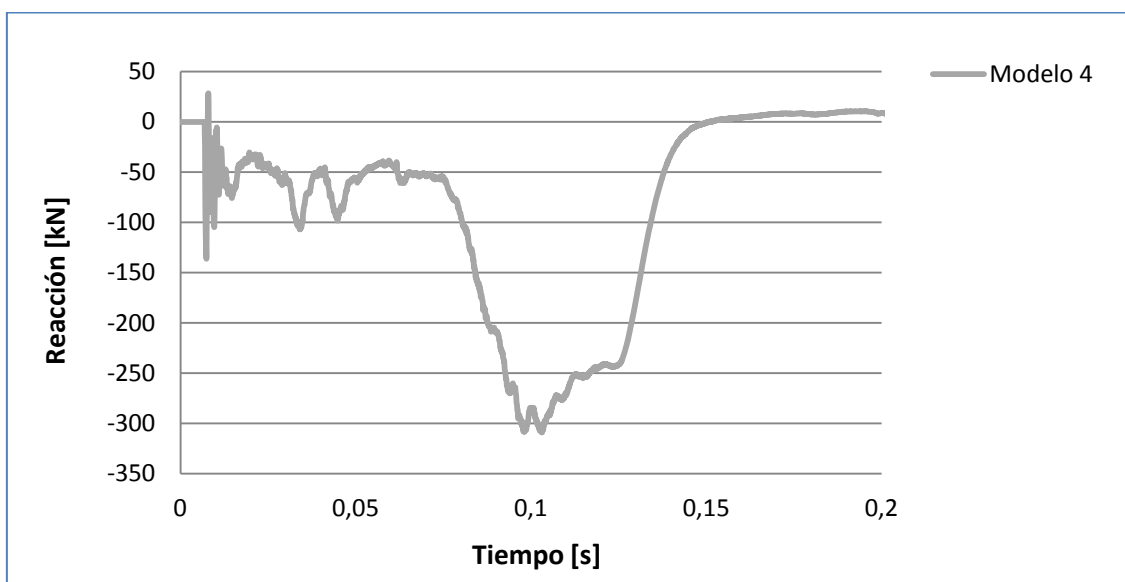


Ilustración 107. Modelo 4. Reacción vs. Tiempo.

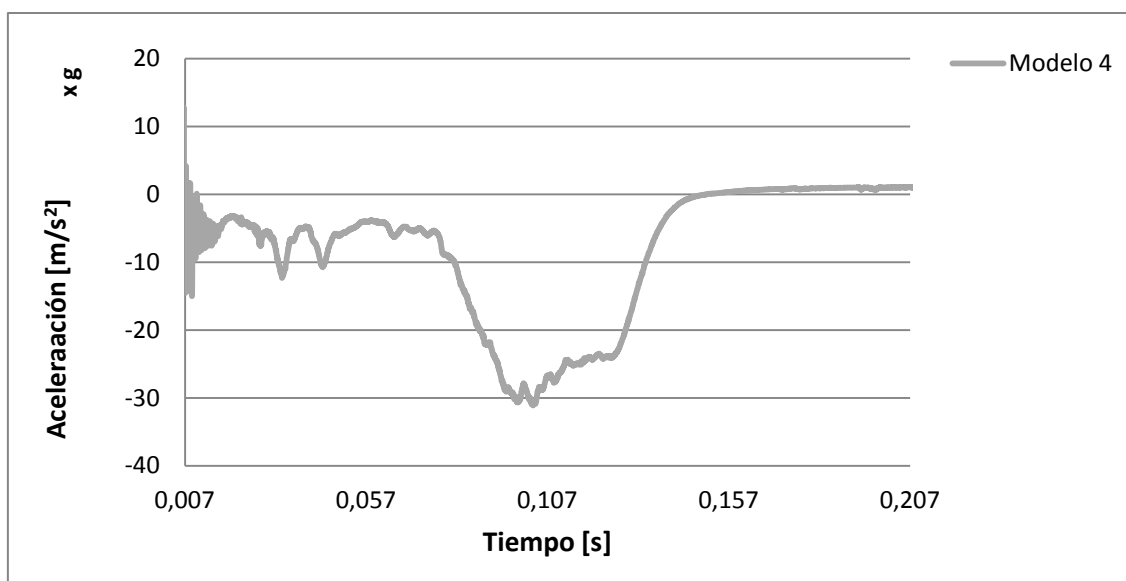


Ilustración 108. Modelo 4. Aceleración vs. Tiempo.

La Ilustración 109 muestra la disipación de energía del modelo.

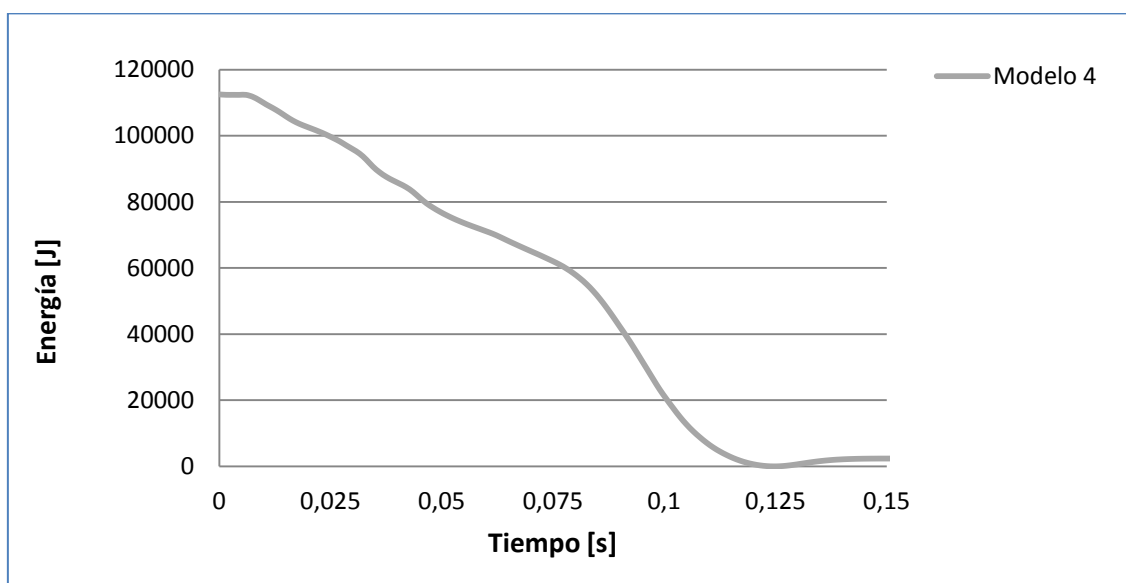


Ilustración 109. Modelo 4. Energía vs. Tiempo.

A continuación se muestra el proceso de deformación de la estructura en la Ilustración 110 en diferentes instantes de tiempo.

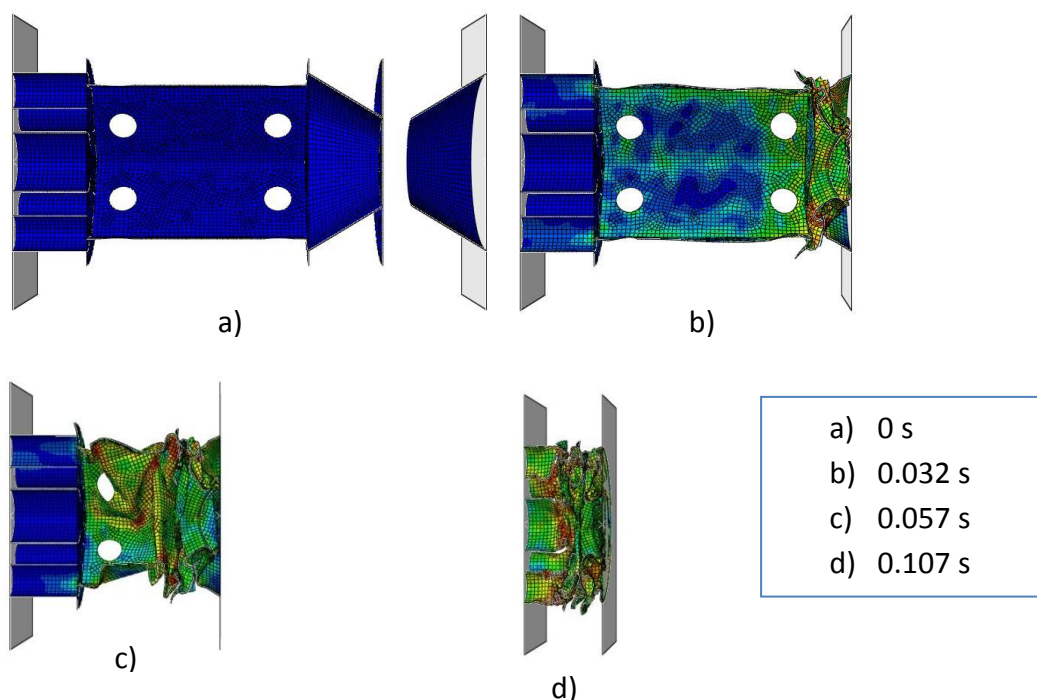


Ilustración 110. Proceso de deformación del modelo 4.

Variables de interés

- Longitud deformada de la estructura:

$$\Delta L = 1.20 \text{ m}$$

- Masa de la estructura total:

$$m = 15.43 \text{ kg}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto antes de la deformación de la estructura de sección multitubular:

$$\text{Reacción máxima} = 136.10 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 15.03 \text{ g}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto de todo el impacto:

$$\text{Reacción máxima} = 308.93 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 31.13 \text{ g}$$

- Energía específica del modelo:

$$Ee = 9099.81 \text{ J/kg}$$

- Capacidad de absorción de energía del modelo:

$$Ca = 93.61 \text{ J/mm}$$

Conclusiones

Cambiando las dimensiones de esta estructura podemos observar diversas mejoras. La primera es que se evita el pandeo de la sección multitubular sin comprometer la frenada del tren. La segunda tiene que ver con la capacidad de absorción de la energía, su disminución indica que la estructura se ha deformado casi en su totalidad pero no se consigue la reducción del pico de aceleración en el último cambio de sección. El principal problema encontrado en esta estructura es la presencia de pandeos en la zona de sección hexagonal debido al aumento de longitud, y no se disipa toda la energía posible provocando un aumento de las reacciones y aceleraciones en el cambio a la sección multitubular. La Ilustración 111 muestra la estructura del modelo 4 tras el impacto.

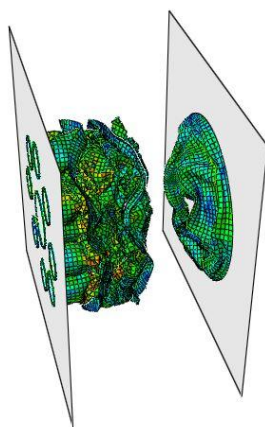


Ilustración 111. Estructura deformada. Modelo 4.

4.6.5. Modelo Final.

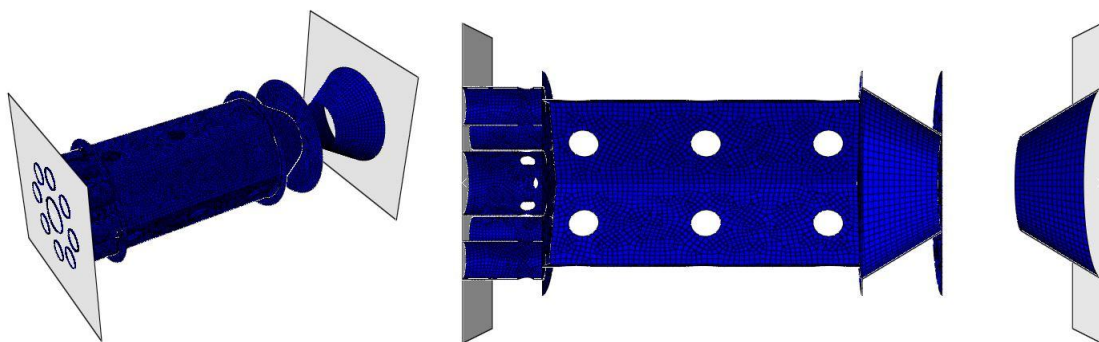


Ilustración 112. Modelo Final.

El último modelo estudiado estará compuesto por las mismas cuatro partes que formaban los anteriores, Ilustración 112. La principal diferencia es la incorporación de una serie adicional de agujeros en las secciones multitubular y hexagonal. Lo que se pretende con estos taladros es reducir los picos de reacción y aceleración, y evitar el pandeo en la sección hexagonal. Las dimensiones de las estructuras que forman parte del modelo final se muestran en la Tabla 25 y en la Ilustración 113.

Tabla 24. Dimensiones Modelo 4.

Estructura	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Multicircular con agujeros	250	1
Hexagonal con 18 agujeros	1000	1.5
Troncos de cono	250	1.25
Placas intermedias	-	1

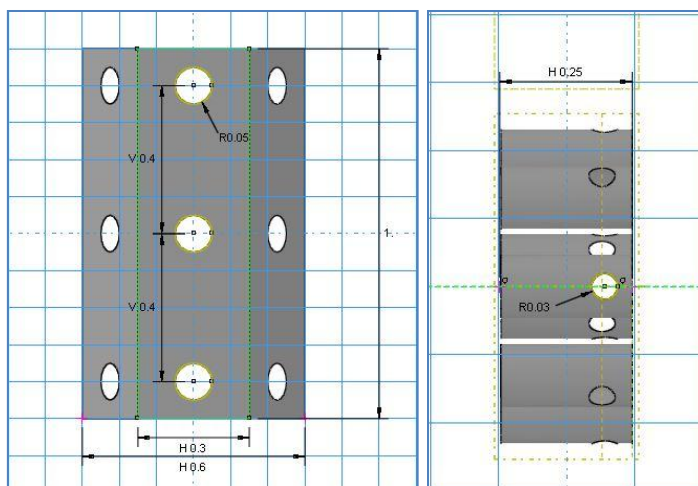


Ilustración 113. Dimensiones de la sección hexagonal y multicircular. Modelo Final.

Resultados

Las ilustraciones 114 y 115 muestran reacciones en la placa fija y aceleraciones en la placa móvil. Se observa como se ha reducido el valor máximo de reacciones y aceleraciones.

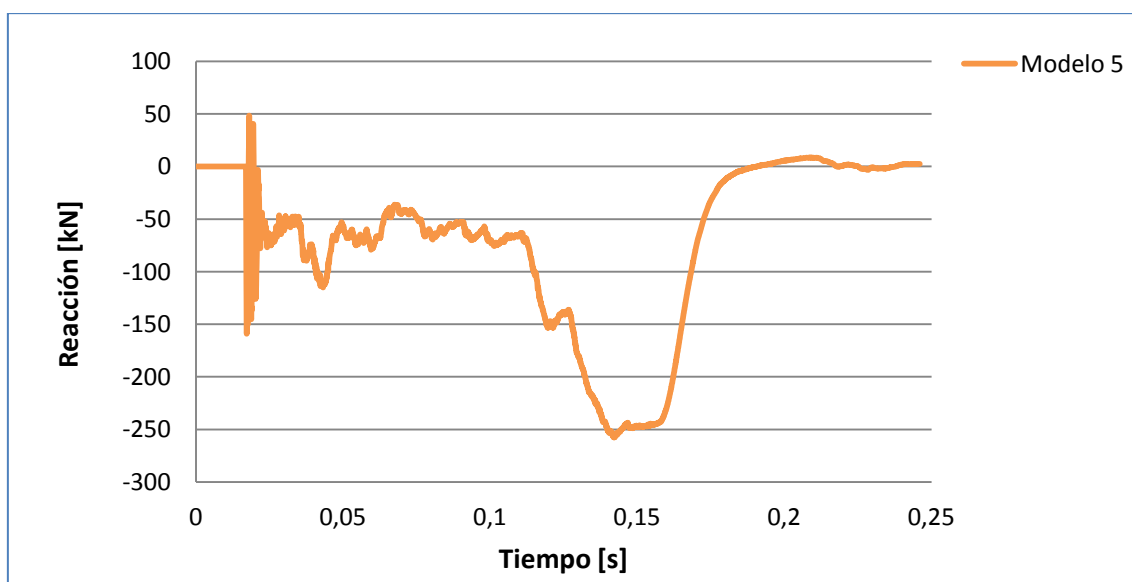


Ilustración 114. Modelo Final. Reacción vs. Tiempo.

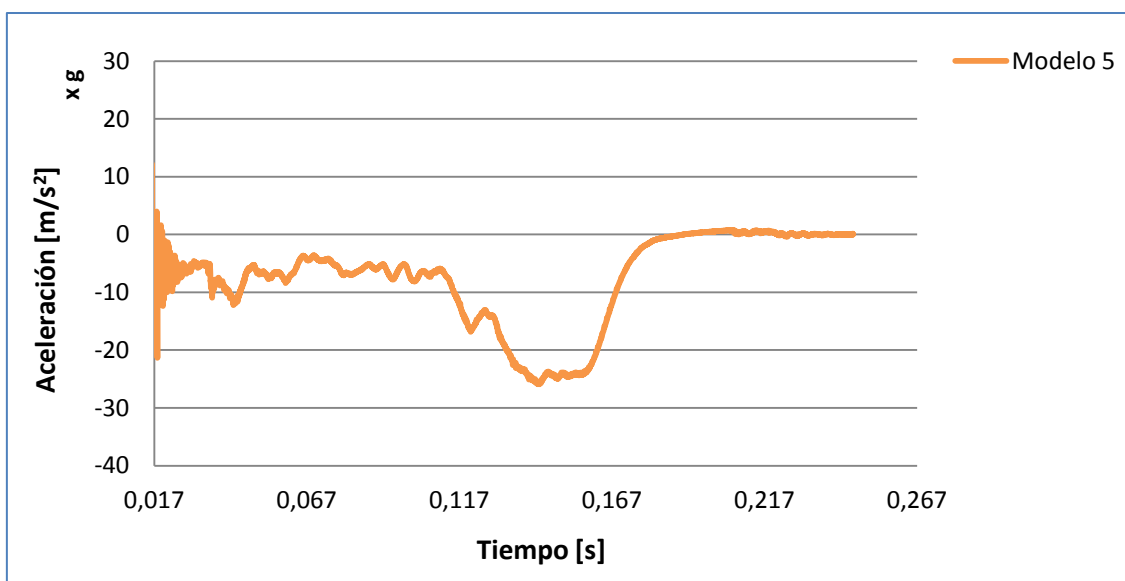


Ilustración 115. Modelo Final. Aceleración vs. Tiempo.

El proceso de disipación de energía del modelo final se muestra a continuación, Ilustración 116. A diferencia de lo ocurrido en los modelos anteriores, en este se disipa con mayor eficacia la energía ya que la recta de resultados tiene una pendiente, aproximadamente, constante.

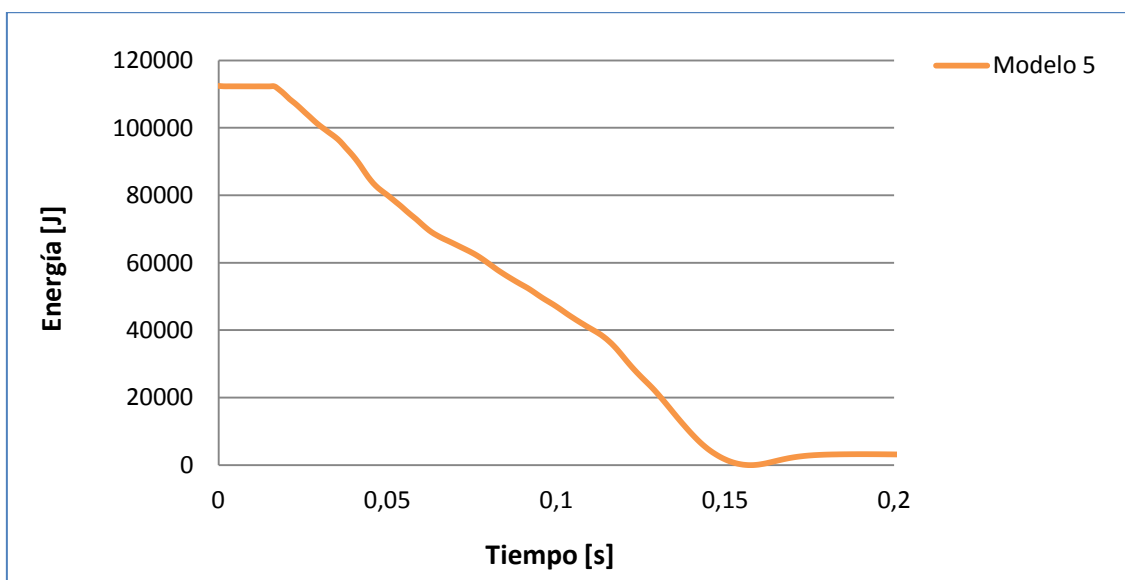


Ilustración 116. Modelo 2. Energía vs. Tiempo.

A continuación en la ilustración 117 se muestra el proceso de deformación de la estructura en diferentes instantes de tiempo.

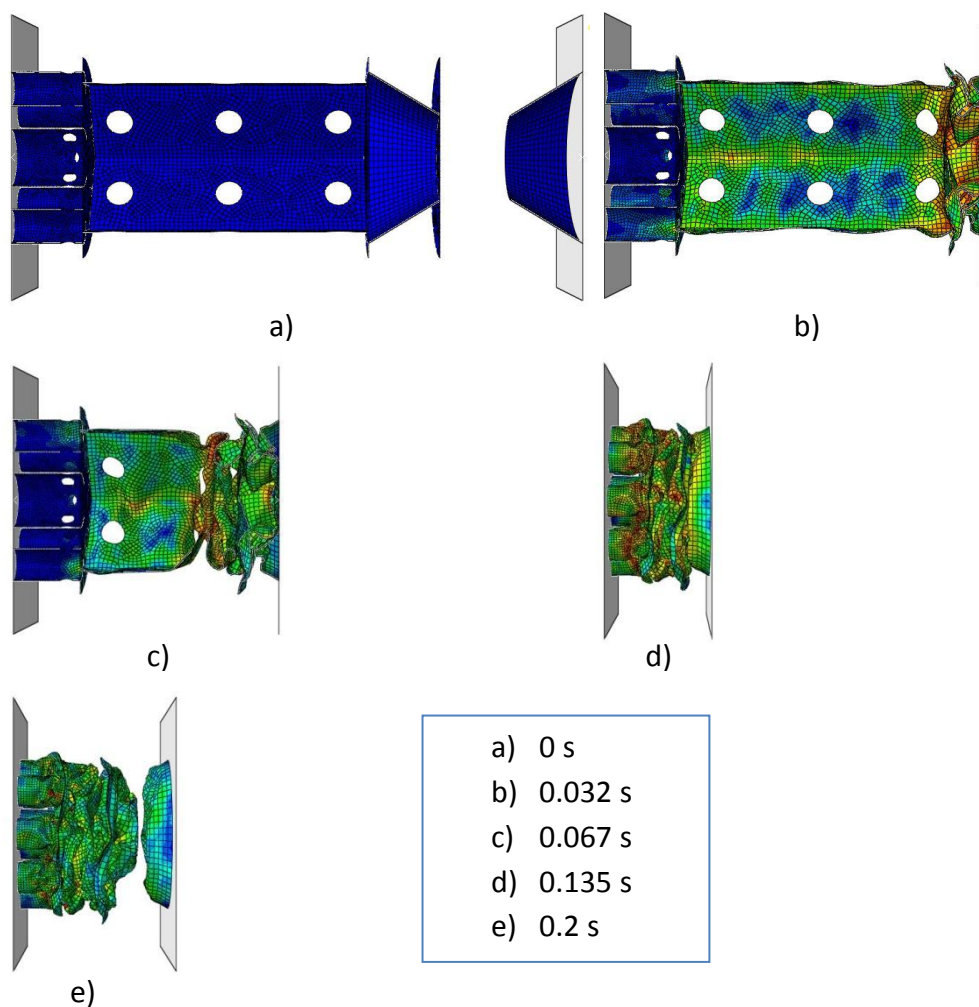


Ilustración 117. Proceso de deformación del modelo 2.

Variables de interés

- Longitud deformada de la estructura:

$$\Delta L = 1.36 \text{ m}$$

- Masa de la estructura total:

$$m = 14.95 \text{ kg}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto antes de la deformación de la estructura de sección multitubular:

$$\text{Reacción máxima} = 158.94 \text{ kN}$$

$$\text{Aceleración máxima} = 21.33 \text{ g}$$

- Reacción y aceleración máxima en valor absoluto de todo el impacto:

$$Reacción\ máxima = 257.55\ kN$$

$$Aceleración\ máxima = 25.91\ g$$

- Energía específica del modelo:

$$Ee = 8292.05\ J/kg$$

- Capacidad de absorción de energía del modelo:

$$Ca = 82.64\ J/mm$$

Conclusiones

La incorporación de diferentes taladros en diferentes puntos del modelo, tanto en la parte multitubular como en la hexagonal, consiguen disminuir el valor absoluto del pico de aceleración en casi un 20% respecto al modelo anterior, lo que se considera una importante mejora del sistema de frenado. Se evita, además, el pandeo de la estructura en la zona de sección hexagonal proporcionando una deformación casi total de la estructura. La energía específica no es muy alta debido a la gran cantidad de masa deformada de este modelo. La Ilustración 118 muestra la estructura deformada tras el impacto.

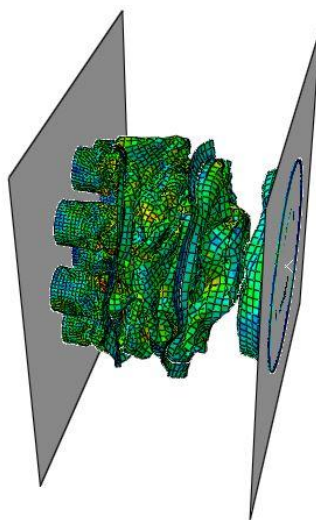


Ilustración 118. Estructura deformada. Modelo Final.

Capítulo V. Conclusiones y Trabajos Futuros

5. Conclusiones y trabajos futuros

Tras la realización de todas las fases se puede concluir que se ha conseguido una estructura optimizada respecto a los modelos de sección simple.

La disminución de las aceleraciones a lo largo del proyecto era uno de los objetivos principales. La Ilustración 119 muestra esta mejora en el momento del impacto con una clara disminución respecto al modelo hexagonal de 1.5 mm de espesor de la primera fase. La rigidez debe ir aumentando a medida que se frena el vehículo para poder mantener una aceleración casi constante a lo largo del impacto hasta la parada final. Esto ayuda a una frenada más rápida y eficaz siendo la aceleración lo suficientemente baja como para no comprometer la seguridad de los ocupantes del tren.

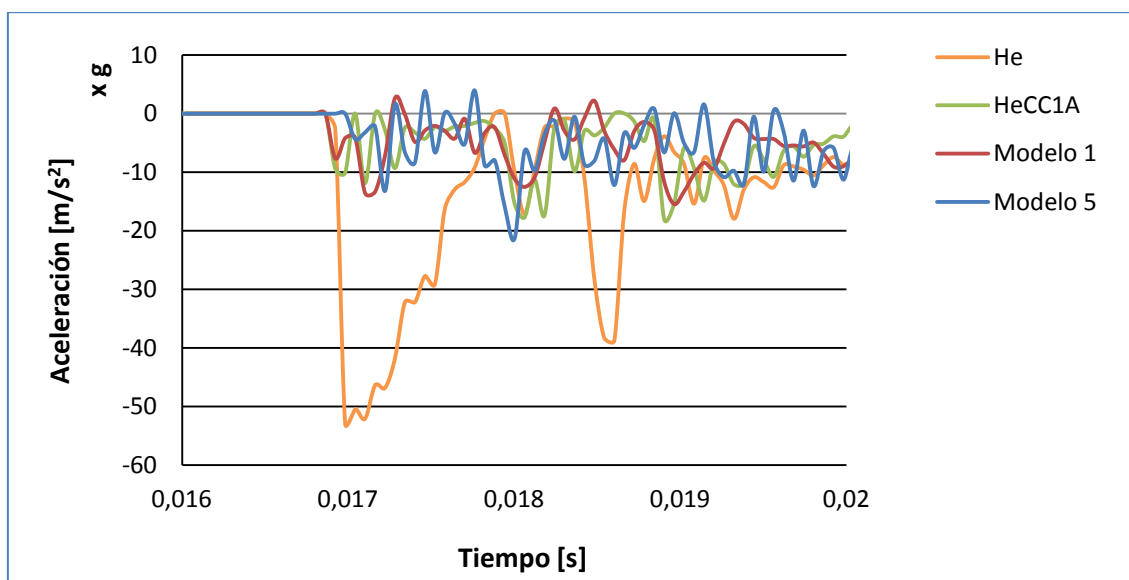


Ilustración 119. Comparación de resultados. Aceleración vs. Tiempo 1.

Además, también se ha disminuido la aceleración en un 70% cuando la colisión llega a la parte de sección multitubular, Ilustración 120.

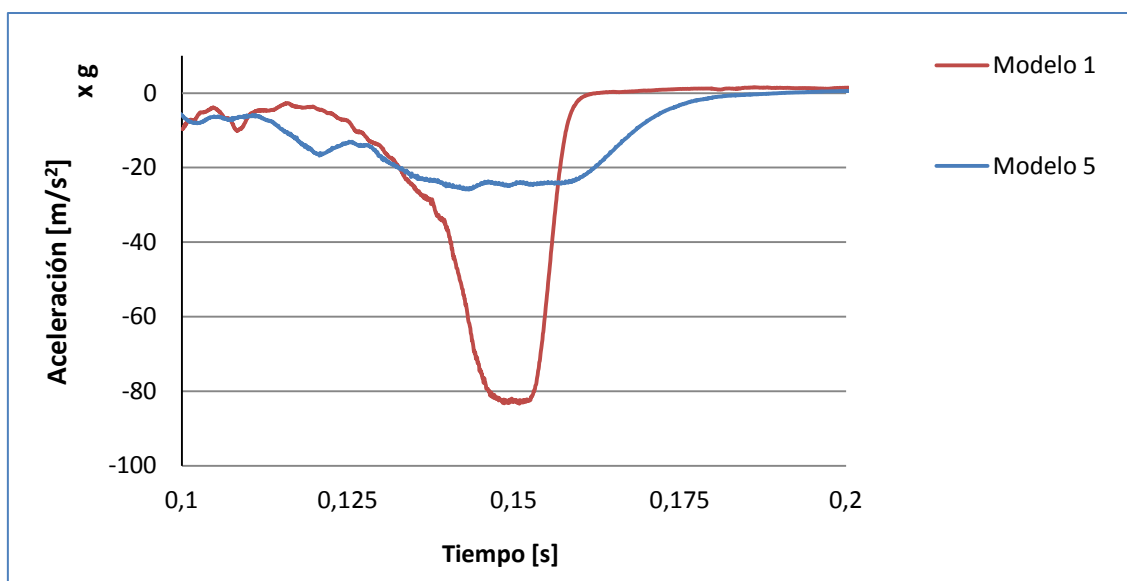


Ilustración 120. Comparación de resultados. Aceleración vs. Tiempo 2.

La deformación de la estructura del modelo final es más uniforme que la obtenida en el modelo 1 y se ve reflejado en la Ilustración 121 con la gráfica de Energía vs. Tiempo. La pendiente de la recta del modelo 5 es casi constante a lo largo del impacto y por tanto, se ha alcanzado una mejor eficiencia a la hora de disipar la energía.

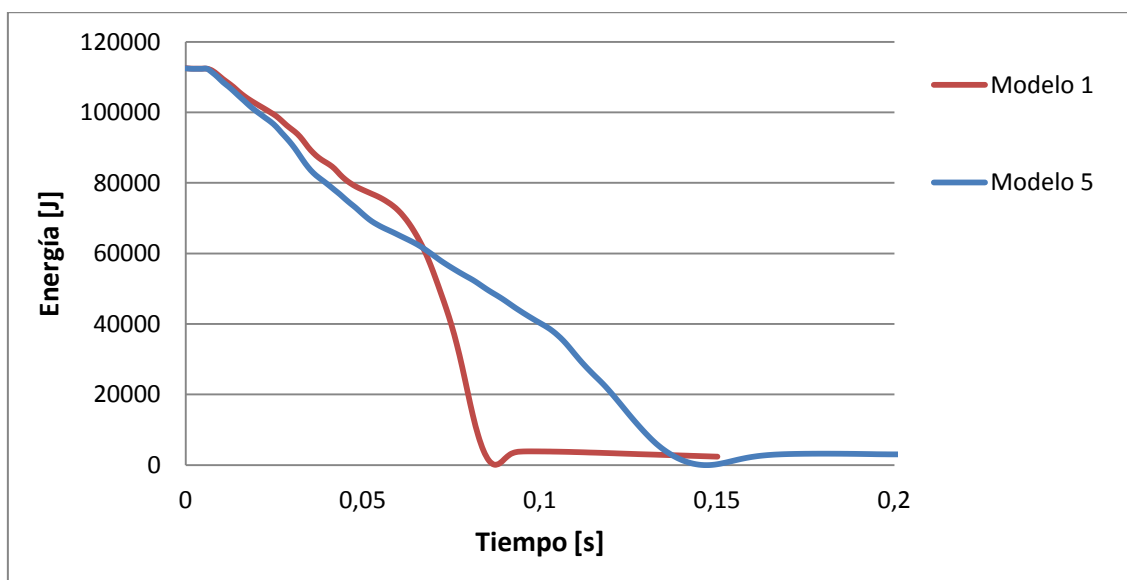


Ilustración 121. Comparación de resultados. Energía vs. Tiempo.

El uso de triggers, troncos cónicos y placas en las uniones de las estructuras que conforman el modelo, consiguen disminuir los valores absolutos de las reacciones y aceleraciones, y aportan al modelo una mayor resistencia frente a colisiones.



Trabajos Futuros

Dentro de los trabajos futuros que se podrían realizar como continuación al presente trabajo fin de grado sería el estudio de estructuras similares con la incorporación de espumas metálicas en su interior, estructuras de aluminio o magnesio de poca densidad para mejorar las capacidades de absorción de energía.

Otro de los posibles trabajos que se podría realizar es el estudio de estos impactos en estructuras fabricadas con diferentes materiales e incluso varios materiales en el mismo modelo. El uso de materiales compuestos está en auge y su estudio puede ser de gran interés para una optimización de la capacidad de absorber energía de las estructuras de seguridad de vehículos.

Capítulo VI. Desarrollo del proyecto y presupuesto

6. Desarrollo del proyecto y presupuesto

6.1. Diagrama Gantt del proyecto

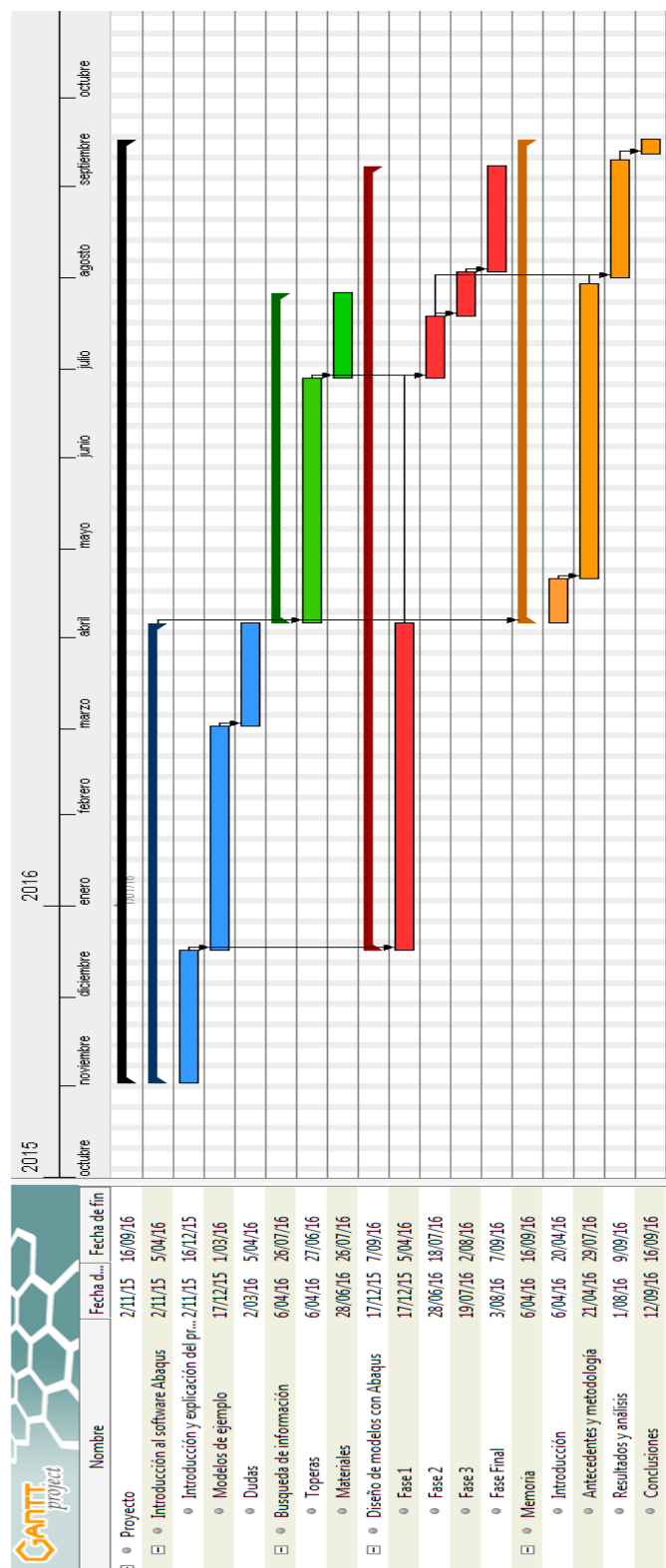


Ilustración 122. Diagrama de Gantt. Cortesía de GanttProject

6.2. Presupuesto

En esta parte del proyecto se estiman los costes del desarrollo del proyecto.

6.2.1. Costes laborales

Los costes humanos de trabajo se consideran según días y horas de trabajo, tipo de trabajador y salario medio. La siguiente Tabla 25 muestra las diferentes variables que se han tenido en cuenta para este apartado.

Tabla 25. Coste Laboral

Fase del proyecto	Tiempo (días)	Tiempo medio de trabajo (horas/día)	Tiempo total (horas)	Trabajador	Salario (€/hora)	Coste laboral (€)
Introducción al software	40	1	40	Ingeniero Junior	15	600
				Ingeniero Senior	25	1000
Búsqueda de información	60	3	180	Ingeniero Junior	15	2700
Diseño del modelo final	140	4	560	Ingeniero Junior	15	8400
Desarrollo de la memoria	110	4	440	Ingeniero Junior	15	6600
Supervisión del proyecto	15	2	30	Ingeniero Senior	25	750
Coste laboral total						20050 €

6.2.2. Costes materiales

En este apartado del presupuesto se muestran los diferentes equipos que se han utilizado para la realización del proyecto. En este caso se indica el coste de cada producto así como los meses utilizados y su amortización. La Tabla 26 refleja los costes del software y hardware utilizados.

Tabla 26. Costes materiales

Producto	Coste (€)	Periodo de amortización (meses)	Uso del producto (meses)	Porcentaje amortizado (%)	Coste del material (€)
Samsung 5 Series NP530U3B	500	24	8	33.33	166.66
Licencia Microsoft Office	149	48	4	8.33	12.41
Licencia Abaqus CAE	21950	12	7	58.33	12804.16
Licencia GanttProject	Gratis	-	1	-	-
Coste Material Total	12983.23				

6.2.3. Coste Total del proyecto

$$\text{Costes Laborales} + \text{Costes Materiales} = 33033.23 \text{ €} \quad (11)$$

Capítulo VII. Referencias e Índices

Bibliografía

1. **Statista.** Worldwide automobile production from 2000 to 2015 (in million vehicles). [Online] Statista, 2016. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>.
2. **DGT.** Tablas estadísticas de accidentes. [Online] 2016. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/accidentes-30dias/tablas-estadisticas/>.
3. **Alghamdi, A.A.A.** Collapsible impact energy absorbers: an overview. [Online] 2001. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823100000483>.
4. **DGT.** La seguridad en los vehículos. [Online] 2016. [Cited: Julio 10, 2016.] <https://www.google.es/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=elementos%20pasivos%20y%20activos%20dgt>.
5. **Smith, Mike.** Buffers. [Online] 2003. <http://myweb.tiscali.co.uk/gansg/4-rstock/04arstock2c.htm>.
6. **Rawie.** History of track closures. [Online] 2016. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://www.rawie.de/index.php/gb/bahntechnik/historie>.
7. **Ramsgate.** The railway arrives at Ramsgate. [Online] 2016. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://ramsgatehistory.com/trains.html>.
8. **La ligne Paris - Granville**, 150 ans d'Histoire. [Online] 2005. [Cited: Julio 9, 2016.] <http://cheminfergranville.net/accident.htm>.
9. **Bugarín, Miguel R and García Díaz-de-Villegas, José-Manuel.** Conception of buffer stop blocks. [Online] Universidad de La Coruña. [Cited: Julio 10, 2016.] http://www.uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/poster/2_1/329.pdf.
10. **Llalco.** Llalco. División industrial. [Online] 2016. [Cited: Julio 10, 2016.] <http://www.llalco.com/es/division-industrial>.
11. **Oleo.** End Stops. [Online] 2016. [Cited: Julio 10, 2016.] <http://www.oleo.co.uk/products/end-stops>.
12. **Railyard-Safety.** RAILYARD-SAFETY PRODUCTS. [Online] 2016. [Cited: Julio 10, 2016.] <http://www.railyard-safety.com/RailYard-Safety-Products.aspx>.
13. **Machinery, Jining H. Mining.** Rail retarder. [Online] 2016. [Cited: Julio 10, 2016.] <http://www.chinahwgroup.com/Product/6847954836.html>.



14. **Hydro company.** Aluminium, environment and society. [Online] 2012. [Cited: Julio 10, 2016.] http://www.hydro.com/upload/Documents/downloadcenter/About%20aluminium/Aluminium_environment-and-society.pdf.
15. **I.J.Mcgregor, et al.** IMPACT PERFORMANCE OF. [book auth.] NORMAN JONES and TOMASZ WIERZBICKI. *STRUCTURAL CRASHWORTHINESS*. s.l. : Taylor & Francis, 2010.
16. **Aircraft materials company.** Aluminium Alloy 1100. [Online] [Cited: Julio 9, 2016.] <http://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/1100.html>.
17. **Tiwari, G., et al.** The ballistic resistance of thin aluminium plates. 2014.
18. **Brown, University of.** Constitutive Laws. [Online] 2016. [Cited: Junio 29, 2016.] http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En221/Notes/Constitutive_Laws/Constitutive_Laws.htm.
19. **Langseth, M., Berstad, T. and Hopperstad, O.S.** Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. [Online] 1999. [Cited: Julio 21, 2016.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X98000700>.
20. **Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.** *El método de los elementos finitos*. s.l. : MacGraw-Hill, 1994.

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Crecimiento del uso de vehículos en el siglo XXI. Cortesía de Statista	6
Ilustración 2. Amortiguador por muelle de Sir John Brown (6).....	13
Ilustración 3. Topera de madera (6)	14
Ilustración 4. Accidente de Montparnasse (8)	14
Ilustración 5. Topera de acero de 1910 (6)	15
Ilustración 6. Topera de fricción (1913) (6)	15
Ilustración 7. Topera actual con sistema de muelles y fricción (6)	16
Ilustración 8. Topera fija simple. Cortesía de H. J. Skelton and Co	17
Ilustración 9. Topera fija con amortiguador hidráulico (10)	18
Ilustración 10. Amortiguador hidráulico. Posición de reposo (10)	19
Ilustración 11. Amortiguador hidráulico. Posición intermedia (10).....	20
Ilustración 12. Amortiguador hidráulico. Posición intermedia (10).....	20
Ilustración 13. Toperas de fricción (6)	21
Ilustración 14. Topera de fricción sin elementos amortiguadores (6)	22
Ilustración 15. Topera de fricción con amortiguador hidráulico (11)	23
Ilustración 16. Topera con zapata (6)	23
Ilustración 17. Topera de descarrilamiento controlado (12)	24
Ilustración 18. Topera de descarrilamiento controlado (13)	24
Ilustración 19. Situación del uso de aluminio (14)	25
Ilustración 20. Reducción de peso según el material utilizado en tanto por ciento.....	26
Ilustración 21. Reacción y aceleración vs. Tiempo. Tubo de sección cuadrada de espesor 1.5 mm	32
Ilustración 22. Discretización de un modelo simple. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M	34
Ilustración 23. Deformación de un tubo de sección fina cuadrada	35
Ilustración 24. Elementos 1D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M	35
Ilustración 25. Elementos 2D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M	36
Ilustración 26. Elementos 3D. Cortesía del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras UC3M	36
Ilustración 27. Estructuras tras el uso del módulo Part	38
Ilustración 28. Propiedades del Aluminio 1100-H12. Unidades en el sistema internacional.....	39
Ilustración 29. Creación de la sección	40
Ilustración 30. Asignación de la sección	40
Ilustración 31. Ensamblaje de las partes creadas.....	41
Ilustración 32. Step del ejemplo	42
Ilustración 33. Field y History Output.....	43
Ilustración 34. Mallado del ejemplo	45

Ilustración 35. Job Manager	45
Ilustración 36. Tubo circular deformado para 0, 0.075, 0,15 y 0,5 segundos	46
Ilustración 37. Desplazamiento vs. Tiempo. Placa móvil del ejemplo	46
Ilustración 38. Modelo cilíndrico simple	48
Ilustración 39. Modelo cilíndrico con tronco de cono y agujeros en la parte frontal....	49
Ilustración 40. Modelo multitubular hexagonal. Forma de Panal.....	49
Ilustración 41. Ejemplo de modelo de la fase final.	50
Ilustración 42. Modelos cilíndricos con diferentes tamaños de malla. a) 0.01,b) 0.02 y c) 0.04 m de lado.	51
Ilustración 43. Diferentes tamaños de malla 1. Reacción vs. Tiempo.....	52
Ilustración 44. Diferentes tamaños de malla 2. Reacción vs. Tiempo.....	53
Ilustración 45. Modelo de sección cuadrada.....	54
Ilustración 46. Deformación del modelo de sección cuadrada con tres espesores diferentes, a) 1, b) 1.5 y c) 2 mm.....	55
Ilustración 47. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección cuadrada ...	56
Ilustración 48. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección cuadrada.....	57
Ilustración 49. Modelo de sección hexagonal	57
Ilustración 50. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección hexagonal ..	58
Ilustración 51. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección hexagonal	58
Ilustración 52. Modelo de sección circular.....	59
Ilustración 53. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección circular	59
Ilustración 54. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección circular	60
Ilustración 55. Modelo de sección octogonal.....	60
Ilustración 56. Reacción vs. Tiempo. Simulaciones de un tubo de sección octogonal ..	61
Ilustración 57. Reacción vs. Tiempo. Colisión en la sección octogonal.....	61
Ilustración 58. Comparación entre secciones básicas. Reacción vs. Tiempo.....	62
Ilustración 59. Comparación entre secciones básicas. Aceleración vs. Tiempo	63
Ilustración 60. Deformaciones sección básica. Deformación vs. Tiempo	64
Ilustración 61. Configuración de los agujeros del modelo circular	67
Ilustración 62. Modelos de sección circular con diferente número de agujeros. Reacción vs. Tiempo	68
Ilustración 63. Modelos de sección circular con diferente número de agujeros. Aceleración vs. Tiempo.....	68
Ilustración 64. Modelos de sección circular con y sin tronco cónico	69
Ilustración 65. Modelos de sección circular con y sin tronco de cono. Reacción vs. Tiempo.....	70
Ilustración 66. Modelos con la estructura de tronco de cono y sin él. Aceleración vs. Tiempo.....	70
Ilustración 67. Modelos de sección circular con y sin placa de amortiguamiento	71
Ilustración 68. Modelos con la estructura de tronco de cono con placa y sin placa. Reacción vs. Tiempo	72

Ilustración 69. Modelos con la estructura de tronco de cono con placa y sin placa. Aceleración vs. Tiempo.....	72
Ilustración 70. Modelos de sección cuadrada con tronco cónico y agujeros. Reacción vs. Tiempo.....	73
Ilustración 71. Modelos de sección cuadrada con tronco cónico y agujeros. Aceleración vs. Tiempo.....	74
Ilustración 72. Modelos de sección hexagonal con tronco cónico y agujeros. Reacción vs. Tiempo.....	74
Ilustración 73. Modelos de sección hexagonal con tronco cónico y agujeros. Aceleración vs. Tiempo.....	75
Ilustración 74. Dimensiones y modelo multitubular cuadrado.....	76
Ilustración 75. Reacción vs Tiempo. Modelo multitubular de sección cuadrada	77
Ilustración 76. Aceleración vs. Tiempo. Modelo multitubular de sección cuadrada	77
Ilustración 77. Modelos multitubulares de sección circular	78
Ilustración 78. Dimensiones de los modelos multitubulares de sección circular	78
Ilustración 79. Reacción vs. Tiempo. Modelos multitubulares de sección circular	79
Ilustración 80. Aceleración vs. Tiempo. Modelos multitubulares de sección circular ...	80
Ilustración 81. Modelos multitubular hexagonal, panel	80
Ilustración 82. Reacción vs. Tiempo. Sección con forma de panel.....	81
Ilustración 83. Aceleración vs. Tiempo. Sección con forma de panel.	82
Ilustración 84. Reacción vs. Tiempo. Estructuras multitubulares	83
Ilustración 85. Aceleración vs. Tiempo. Estructuras multitubulares.....	83
Ilustración 86. Modelos multitubulares. Deformación vs. Tiempo.....	84
Ilustración 87. Modelo 1. Fase Final.....	87
Ilustración 88. Dimensiones de la sección hexagonal y tronco cónico. Modelo 1.....	87
Ilustración 89. Modelo 1. Reacción vs. Tiempo.....	88
Ilustración 90. Modelo 1. Aceleración vs. Tiempo.	89
Ilustración 91. Modelo 1. Energía vs. Tiempo.	89
Ilustración 92. Proceso de deformación del modelo 1.	90
Ilustración 93. Estructura deformada. Modelo 1.	91
Ilustración 94. Modelo 2. Fase Final.....	92
Ilustración 95. Modelo 2. Reacción vs. Tiempo.....	93
Ilustración 96. Modelo 2. Aceleración vs. Tiempo.	93
Ilustración 97. Modelo 2. Energía vs. Tiempo.	94
Ilustración 98. Proceso de deformación del modelo 2.	94
Ilustración 99. Estructura deformada. Modelo 2.	96
Ilustración 100. Modelo 3. Reacción vs. Tiempo.....	97
Ilustración 101. Modelo 3. Aceleración vs. Tiempo.	97
Ilustración 102. Modelo 3. Energía vs. Tiempo.	98
Ilustración 103. Proceso de deformación del modelo 3.	98
Ilustración 104. Estructura deformada. Modelo 3.	99



Ilustración 105. Modelo 4.....	100
Ilustración 106. Dimensiones de la sección hexagonal. Modelo 4.	101
Ilustración 107. Modelo 4. Reacción vs. Tiempo.....	101
Ilustración 108. Modelo 4. Aceleración vs. Tiempo.	102
Ilustración 109. Modelo 4. Energía vs. Tiempo.	102
Ilustración 110. Proceso de deformación del modelo 4.	103
Ilustración 111. Estructura deformada. Modelo 4.	104
Ilustración 112. Modelo Final.	105
Ilustración 113. Dimensiones de la sección hexagonal y multicircular. Modelo Final.	106
Ilustración 114. Modelo Final. Reacción vs. Tiempo.	106
Ilustración 115. Modelo Final. Aceleración vs. Tiempo.....	107
Ilustración 116. Modelo 2. Energía vs. Tiempo.	107
Ilustración 117. Proceso de deformación del modelo 2.	108
Ilustración 118. Estructura deformada. Modelo Final.	109
Ilustración 119. Comparación de resultados. Aceleración vs. Tiempo 1.	111
Ilustración 120. Comparación de resultados. Aceleración vs. Tiempo 2.	112
Ilustración 121. Comparación de resultados. Energía vs. Tiempo.	112
Ilustración 122. Diagrama de Gantt. Cortesía de GanttProject.....	115

Índice de tablas

Tabla 1. Accidentes y víctimas, año 2002 (2)	7
Tabla 2. Accidentes y víctimas, año 2014 (2)	7
Tabla 3. Composición del aluminio 1100-H12 en porcentajes.....	28
Tabla 4. Propiedades del aluminio 1100-H12	28
Tabla 5. Dimensiones utilizadas para el caso de ejemplo	38
Tabla 6. Diferentes mallados	51
Tabla 7. Tamaño de malla refinado	52
Tabla 8. Características principales de los modelos de sección básica	54
Tabla 9. Aceleraciones sección básica	63
Tabla 10. Energía específica de los modelos de sección básica	65
Tabla 11. Capacidad de absorción de energía de los modelos de sección básica	65
Tabla 12. Abreviaturas. Sección circular.....	68
Tabla 13. Abreviaturas. Tronco cónico	70
Tabla 14. Abreviaturas. Secciones Hexagonal y Cuadrada.....	73
Tabla 15. Abreviaturas sección multitubular cuadrada.	77
Tabla 16. Abreviaturas sección multitubular circular.....	79
Tabla 17. Abreviaturas sección multitubular hexagonal.	81
Tabla 18. Energía específica. Secciones multitubulares.....	85
Tabla 19. Capacidad de absorción de energía. Secciones multitubulares	85



Tabla 20. Dimensiones Modelo 1.	87
Tabla 21. Dimensiones Modelo 2.	92
Tabla 22. Dimensiones Modelo 3.	96
Tabla 23. Dimensiones Modelo 4.	100
Tabla 24. Dimensiones Modelo 4.	105
Tabla 25. Coste Laboral	116
Tabla 26. Costes materiales.....	117